

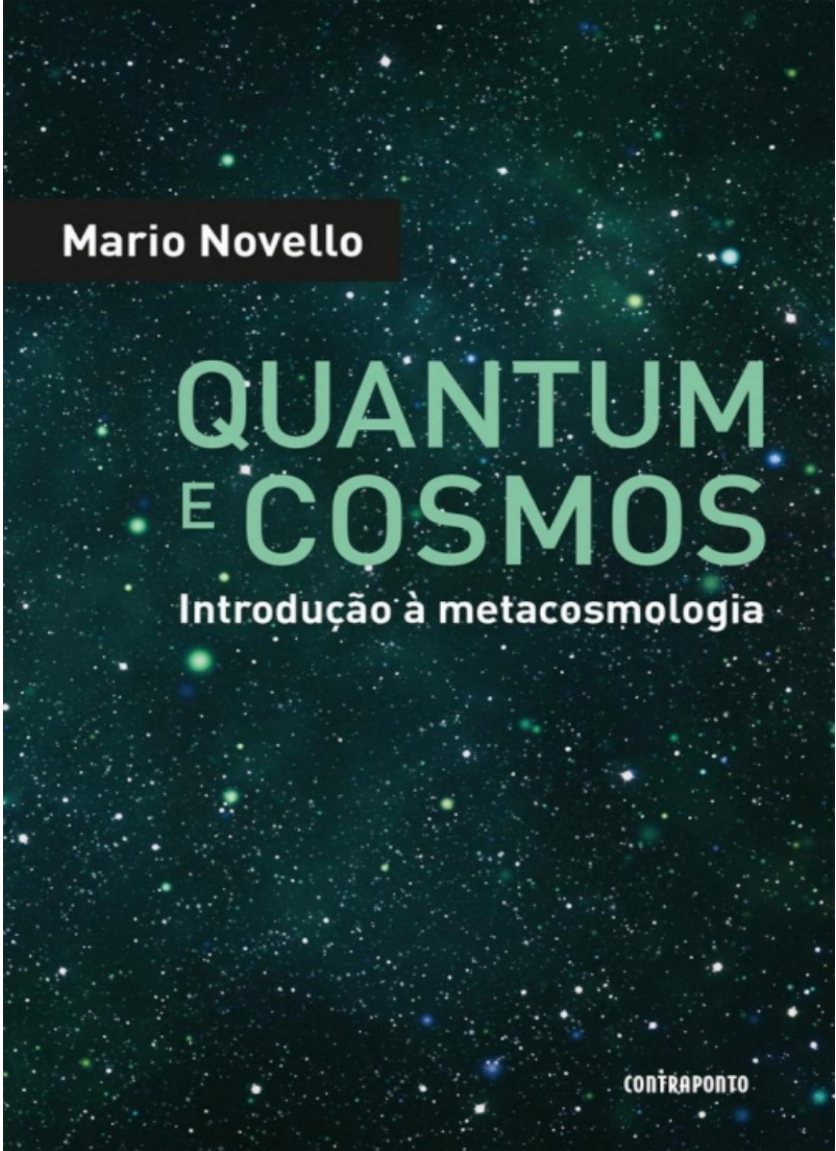
Mario Novello

QUANTUM E COSMOS

Introdução à metacosmologia

CONTRAPONTO





Mario Novello

QUANTUM E COSMOS

Introdução à metacosmologia

CONTRAPONTO

QUANTUM E COSMOS
Introdução à metacosmologia

Mario Novello

QUANTUM E COSMOS

Introdução à metacossmologia

CONTRAPONTO

Rio de Janeiro | 2021

© Mario Novello, 2021

Direitos para o Brasil adquiridos por Contraponto Editora Eireli.

Vedada, nos termos da lei, a reprodução parcial ou total deste livro,
por quaisquer meios, sem autorização da Editora.

Contraponto Editora Eireli

Rua Joaquim Silva 98, 5º andar, Centro, Rio de Janeiro, Cep 20241-110

Telefones: (21) 2544-0206 / 2215-6148

site: www.contrapontoeditora.com.br

e-mail: contato@contrapontoeditora.com.br

Preparação de originais: César Benjamin

Revisão: Cristina da Costa Pereira

Projeto gráfico e diagramação: Regina Ferraz

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

N83q Novello, Mario, 1942-

Quantum e cosmos : introdução à metacosmologia / Mario Novello.

– 1. ed. – Rio de Janeiro : Contraponto, 2021.

178 p. ; 21 cm.

ISBN 978-65-5639-017-8

1. Cosmologia. 2. Teoria quântica. I. Título.

21-73715

CDD: 523.1

CDU: 52

Leandra Felix da Cruz Candido – Bibliotecária – CRB-7/6135

Para Gláucia, amiga, companheira e conselheira

O Universo estava condenado a existir

*Os antigos diziam que a natureza tem horror ao vácuo.
O mundo quântico mostrou que, com efeito, o vazio é instável.*

*Os astrónomos diziam que a natureza tem horror ao infinito.
A cosmologia mostrou que, sob o manto do infinito, o mundo esconde um caos.*

*As religiões antigas acreditavam que o mundo foi criado
em um momento mágico e único, há um tempo finito.
A união do mundo quântico com a cosmologia mostrou
que o mais provável é que o Universo seja eterno.*

*Nos séculos passados, supunha-se que o mundo se
estruturou na estabilidade.
Hoje, os físicos reconhecem que a configuração atual do
cosmos resultou de uma instabilidade.*

Sumário

- [1. Comentário inicial](#)
- [2. Introdução](#)
- [3. Preâmbulo e resumo](#)
- [4. Sobre a linguagem, ou para evitar um vocabulário vazio](#)
- [5. Modos de descrever acontecimentos no espaço-tempo](#)
- [6. A questão causal](#)
- [7. Quantum \(o mundo da microfísica\)](#)
- [8. Múltiplas aparências no microcosmo](#)
- [9. Virtual e real](#)
- [10. A questão cosmológica: dos múltiplos tempos da física ao tempo único da cosmologia](#)
- [11. A constante cosmológica \$\Lambda\$ nas teorias não lineares da matéria](#)
- [12. O início da ideia do Big Bang](#)
- [13. Os primeiros cenários com bouncing](#)
- [14. Das leis físicas às leis cósmicas](#)
- [15. Um salto no vazio: a origem do cosmos](#)
- [16. Utopias científicas \(de Gödel a Markov\)](#)
- [17. Comentário](#)
- [18. O cosmos indeciso \(bifurcação e indeterminismo no cosmos\)](#)
- [19. O cosmos solidário I](#)
- [20. O cosmos solidário II](#)
- [21. Metacosmologia ou esboço de conclusão](#)
- [22. Repetição e diferença \(múltiplos ciclos do Universo\)](#)
- [Apêndice A. Frontispícios de alguns artigos citados neste livro](#)
- [Apêndice B. Campos de longo alcance, gravitação e eletromagnetismo](#)
- [Apêndice C. Universo magnético](#)
- [Apêndice D. É o espaço-tempo uma substância?](#)
- [Referências](#)

1

Comentário inicial

Desde sempre, o homem foi atraído pelo esplendor do Universo.

Adentrar a cosmologia, usar a razão e o método científico para perscrutar o Universo deveriam ser um momento grandioso do pensamento.

Mas, ao longo do século XX, a cosmologia encolheu esse maravilhamento, deixando em seu lugar equações que não fazem sentido para a grande maioria dos não iniciados e cuja interpretação não aprofunda a reflexão sobre o mundo.

A acreditarmos em Heidegger, a ciência não pode mais ser entendida como um valor de civilização. Tornou-se um afazer técnico e prático. No caminho em que se desenvolveu, não permite produzir modos de pensar amplos, capazes de despertar o espírito e produzir reflexão sobre o mundo.

Contrariamente a essa visão negativa do filósofo, veremos que a cosmologia está gerando um movimento de ideias que vão na direção oposta, permitindo um despertar do espírito. Em particular, veremos como certa atividade, construída a partir da análise da estrutura do Universo, deu origem a um caminho de renovação do pensamento, que chamaremos de metacosmologia.

De modo preliminar, podemos distinguir a cosmologia, que trata deste Universo, e a metacosmologia, que trata de todos os Universos possíveis.

Na tarefa de produzir novos modos de pensar, a metacosmologia se apodera, em particular, daquela que Heidegger considera ser a questão fundamental da metafísica: “por que existe alguma coisa em vez de nada?”

Entender como isso foi possível é o objetivo principal deste texto.

2 Introdução

O filósofo Martin Heidegger, em seu curso de introdução à metafísica, faz uma avassaladora crítica ao desenvolvimento da ciência no século XX. Um extrato de sua argumentação serve para que possamos entendê-la:

Sur l'état de la science, qui, ici, à l'Université, nous interesse particulièrement, on peut juger de notre situation dans les dernières décennies. Si on voit aujourd'hui deux conceptions, en apparence différentes, de la science, et qui en apparence se combattent, la science comme savoir professionnel technico-pratique et la science comme valeur de civilisation en soi, il n'en reste pas moins qu'elles se meuvent toutes deux sur la même voie de décadence, celle d'une mésinterprétation et d'une enervation de l'esprit. Elles ne se distinguent qu'en ceci, que la conception technico-pratique de la science comme science spécialisée peut encore revendiquer, dans la situation actuelle, l'avantage d'être logique avec elle-même ouvertement et en toute clarté, tandis que l'interprétation, qui réapparaît aujourd'hui, de la science comme valeur de civilisation, essaie de cacher l'impuissance de l'esprit, avec une duplicité inconsciente.

La confusion inhérente à l'absence totale de pensée va même parfois si loin que l'interprétation technico-pratique de la science reconnaît en même temps la science comme valeur de civilisation, de sorte que, dans une égale absence de pensée, toutes deux se comprennent parfaitement bien.

[...] Les domaines des sciences sont séparés par de vastes distances. Elles traitent chacune leur objet d'une manière foncièrement différente. Cette multiplicité de disciplines ainsi émietté doit le peu de cohésion qui lui reste à l'organisation technique d'Universités et de Facultés; et le peu de signification qui lui reste aux objectifs pratiques des spécialités. En revanche, l'enracinement des sciences dans leur fondement essentiel est bel et bien mort.

La science est aujourd'hui, dans toutes ses branches, une affaire technique et pratique d'acquisition et de transmission de connaissances. Elle ne peut nullement, en tant que science, produire un réveil de l'esprit. Elle a elle-même besoin d'un tel réveil. [Introduction à la métaphysique, Ed Gallimard, 1967, p. 60]

Sobre o estado da ciência que, aqui na universidade, interessa-nos particularmente, pode-se julgar nossa situação nas últimas décadas. Se vemos hoje duas concepções de ciência distintas e que se opõem, isto é, a ciência como conhecimento profissional técnico-prático e a ciência como valor de civilização em si, permanece o fato de que ambas seguem o mesmo caminho, o da interpretação errônea e do enfraquecimento do espírito. Elas só se distinguem porque a concepção técnico-prática da ciência como ciência especializada ainda pode reivindicar, na situação atual, a vantagem de ser coerente consigo mesma de forma clara, enquanto a interpretação da ciência como valor de civilização, que aparece novamente nos dias de hoje, tenta esconder a importância do espírito com uma duplicidade inconsciente.

A confusão inerente à total ausência de pensamento vai às vezes tão longe que a interpretação técnico-prática da ciência reconhece, ao mesmo tempo, a ciência como valor de civilização, de modo que, na igual ausência total de pensamento, ambas se entendem perfeitamente bem.

[...] Os domínios das ciências são separados por enormes distâncias. Cada uma delas trata seu objetivo particular de maneira fundamentalmente diferente. Esta multiplicidade de disciplinas, assim fragmentadas, deve a pouca adesão que lhe resta à organização técnica das universidades e das faculdades, e ao pouco significado que lhe resta aos objetivos práticos das diferentes especialidades. Por outro lado, o enraizamento das ciências em seu fundamento essencial está totalmente morto.

A ciência é, hoje, em todos os seus ramos, uma questão técnica e prática de aquisição e transmissão de conhecimentos. Ela não pode, de forma alguma, como ciência, produzir um despertar do espírito. Ela tem, ela mesma, a necessidade desse despertar.

Este nosso texto tem como função mostrar que a cosmologia e sua extensão natural, a metacosmologia, têm provocado uma forma de despertar do pensamento na direção requisitada por Heidegger. Questionaremos aquilo a que os físicos têm dado pouca atenção, entre outras coisas o que chamo de utopias controladas.

Começemos por distinguir cosmologia e metacosmologia.

Como primeira tentativa de explicitar essa distinção, dizemos: a cosmologia trata da aplicação de leis físicas (dependentes do espaço-tempo ou não) ao Universo para explicar observações de natureza global, como a expansão do volume espacial do Universo, a existência da radiação cósmica de fundo, a homogeneidade espacial perdida pela formação de estruturas (galáxias) e outras.

A metacosmologia propõe questões do tipo: por que a massa do nêutron tem precisamente este valor? Por que existe matéria e não antimatéria no Universo? Existe somente um Universo? Poderia ter existido uma fase anterior? Alguns restos desses Universos anteriores podem estar ainda perambulando pelo cosmos atual? Por que existe alguma coisa em vez de nada?

Dizer que “o vazio é instável” não basta como explicação, pois essa resposta depende do exame das propriedades específicas do vazio. Para fazer isso efetivamente, é preciso descrever a teoria na qual esse vazio particular aparece, se organiza, se define. Aqui, devemos questionar a aplicação irrestrita das leis da física terrestre a todo o Universo.

Examinando essas questões, usando as estruturas das leis físicas e suas variações cósmicas controladas pela dinâmica imposta à geometria do espaço-tempo, estamos construindo o lugar da metacosmologia como

propusemos (ver *Cosmos et contexte*, Ed. Masson, 1987).

Entenderemos as razões pelas quais, a partir da segunda década do século XX, uma certa ideia da cosmologia adquiriu uma quase total concordância entre os cientistas com a aplicação, ao Universo, da teoria da gravitação proposta por Albert Einstein. Discutiremos alguns modelos cosmológicos que se desenvolveram, em particular a solução de Alexander Friedmann, que aponta para um Universo dinâmico e singular.

Aparece então a inesperada possibilidade de poder tratar, na ciência, a pergunta fundamental: *qual a origem do Universo?* Examinaremos algumas das respostas apresentadas pelos cientistas em diversos momentos e que requerem distinguir entre a formação do espaço-tempo e a criação da matéria. Isso passa pela análise que envolve o mundo microscópico. Ficará claro que as características globais do Universo têm uma conexão íntima com o mundo das partículas elementares e suas configurações quânticas.

No entanto, malgrado esse sucesso da cosmologia no século em que ela se constituiu, comentarei uma análise crítica que gera dificuldades para essa cosmologia padrão. Em seu favor, vamos ver que esta crítica conduz a uma riqueza de consequências que transcende a ordenação científica e invade outros territórios do pensamento.

Requisitaremos que a cosmologia tenha uma atitude crítica e repensaremos o significado do que chamamos *leis da natureza*. Em particular, enfatizaremos que o cientista não deve aceitar, sem uma análise profunda, que uma lei física terrestre seja automaticamente generalizada para o cosmos.

Reconhecemos que os físicos apoiam com entusiasmo a tentativa de estabelecer uma teoria unificada que contraia a base da explicação de todo processo físico. Mas a cosmologia, como vamos tratá-la aqui, na contramão dessa prática, deve instaurar um inquérito preliminar sobre a validade cósmica dessas leis que se pretende unificar.

Ou seja, a tarefa do cosmólogo não é somente produzir uma ordenação dos processos observados no Universo, usando uma extensão irrestrita das leis físicas. De forma crítica, independentemente de critérios formais universais e absolutos, ele deve principalmente examinar a aceitação, subjacente à cosmologia corrente, da conjectura de que as leis da física terrestre são válidas em todo o Universo.

Uma ideia antiga, abandonada pelo *establishment* durante quase um século de aplicação da física ao Universo, está vindo à tona e parece produzir um terremoto na organização da ciência, gerando, a partir daí, a necessidade de uma reconstrução da ordem científica.

Embora seja uma noção que permeou o pensamento científico há muito tempo, podemos afirmar simbolicamente que ela apareceu com destaque na física no final da década de 1930.

Em 1937, dois artigos publicados em importantes revistas científicas sugeriram que as leis da física podem variar com o tempo cósmico. Em um deles, o físico britânico Paul Dirac propôs que a força gravitacional entre os corpos poderia ter uma característica diferente com o passar do tempo universal. E o físico S. Sambursky, da Palestina, sugeriu que o mundo quântico teria propriedades distintas de acordo com o tempo cósmico.

Ou seja, contrariamente à ideia convencional, esses cientistas propuseram que as leis da física não são universais, mas sim variam com o tempo cósmico.

Exponemos alguns desenvolvimentos dessas propostas iniciais, que geraram um movimento teórico e observacional voltado para analisar as variações das leis físicas no cosmos.

3

Preâmbulo e resumo

Nos últimos cem anos, os cientistas se envolveram em uma das questões mais formidáveis: entender o Universo em que vivemos em sua globalidade. Para isso, foi necessário, no primeiro momento, ultrapassar a versão newtoniana da gravitação e produzir uma nova teoria aplicável a campos extraordinariamente fortes.

A astronomia ampliou o limitado Universo do século XIX, exibindo centenas de bilhões de galáxias para além de nossa Via Láctea. Como cada galáxia possui da ordem de uma centena de bilhão de estrelas, temos de considerar configurações materiais que vão muito além das que estamos acostumados a tratar nos laboratórios terrestres.

Malgrado essa enorme diferença de objetos de estudo, considerou-se que a análise do Universo poderia ser feita com a extrapolação direta da física terrestre. Assim, a cosmologia ficaria reduzida a uma física extragaláctica. Não poderia discutir questões que envolvessem o Universo como entidade global, não poderia questionar sua origem, sua eternidade ou seu eventual começo singular.

Como método de trabalho, a hipótese de que as leis físicas sejam as mesmas em todo o Universo é razoável. No entanto, não podemos esperar que ela possa ser usada em todas as situações. Sua aplicação integral pode provocar dificuldades na interpretação das observações. Sempre se soube que a generalização, para o Universo, das leis físicas terrestres era uma hipótese de trabalho. Elas deveriam ser substituídas quando conseguíssemos estruturar, teórica e observacionalmente, as leis cósmicas. Estamos chegando a esse futuro.

Veremos que a distinção entre a física e a cosmologia não é somente a ordem de grandeza dos agentes envolvidos. É mais profunda. A cosmologia não pretende organizar o mundo subordinando-se a um formalismo lógico, fechado em si, ignorando os teoremas de Gödel. Então, entenderemos por que podemos dizer que, assim como a biologia (cf. Ernst Mayr), a cosmologia é uma ciência histórica.

Em um primeiro momento, descreveremos como Einstein, Friedmann e os primeiros cosmólogos do século XX organizaram a questão cosmológica. Na época, havia total ignorância dos efeitos microscópicos sobre o Universo e vice-versa, mas, a partir da segunda metade daquele século, a inter-relação entre o macro e o microcosmo se estabeleceu gradualmente, até os dias atuais. Tal conexão está presente em toda a cosmologia contemporânea.

Em seguida, trataremos da questão causal. A partir da aceitação da Teoria da Relatividade Restrita na primeira década do século XX, cada observador, cada corpo material, adquiriu um tempo próprio, variável, mas tão bem definido que cada corpo possui uma relação causal, na qual a distinção entre passado e futuro é bem determinada. Pensava-se que essa causação deveria ser entendida como universal. Cada observador poderia afirmar, perfeitamente e com toda certeza, que ao caminhar para seu futuro estaria se afastando de seu passado. Em 1949, o matemático austríaco Kurt Gödel mostrou que a gravitação altera profundamente essa universalidade. Provocou um choque na comunidade científica, que até hoje não se recompôs. Para exemplificar essa estranheza, podemos citar o livro chamado *Gravitation*, de três autores famosos dos Estados Unidos. Esse livro, que recobre mais de quinhentos autores de artigos científicos e livros, não faz nenhuma citação ao importante trabalho de Gödel.

Finalmente, trataremos de questões estudadas na metacosmologia. Veremos que essa parte da ciência é necessária para que a atividade racional de compreender o Universo não tenha limite.

As leis rígidas que a física produziu nos últimos quatrocentos anos e que permitiram organizar um Universo ordeiro e regular estão sendo substituídas por leis cósmicas variáveis, dependentes do tempo cósmico. A violação do determinismo tradicional, produzido por processos de bifurcação descobertos no século XX em laboratórios terrestres, foi estendida para o Universo e mostrou uma situação inesperada: um cosmos hesitante.

Além dessas estranhas surpresas que alteraram profundamente o papel da ciência em nosso imaginário, a mais fantástica novidade veio de uma releitura atualizada de Giordano Bruno, com a imagem de um Universo solidário.

Terminaremos esse sobrevoo na cosmologia contemporânea colocando as bases para que possamos responder à questão que a Teoria da Relatividade Geral propõe sub-repticiamente: *é o espaço-tempo uma substância?*

Em síntese, trataremos do microcosmo e de suas múltiplas aparências; da distinção sombria entre o real e o virtual; dos múltiplos tempos da física e do tempo único da cosmologia; da dependência cósmica das leis físicas. Daremos então um salto no vazio e mesmo além. Veremos o significado do processo de bifurcação exibido por um cosmos indeciso que limita o determinismo. Exibiremos o mecanismo, descoberto pelos cosmólogos, de um

Universo cíclico que produz processos em repetição e as diferenças que podem ocorrer em alguns ciclos. Chegaremos, enfim, ao Universo solidário, antecipado por Giordano Bruno, e à possibilidade de construir uma ética a partir dele.

Sobre a linguagem, ou para evitar um vocabulário vazio

Em vários textos reproduzidos nestas notas, pode-se ver o uso da linguagem matemática com a qual os cientistas descrevem suas ideias sobre o mundo. Para entender o que está dito ali, é necessário um longo aprendizado específico.

Pode-se reproduzir em linguagem convencional, corriqueira, de todo dia, o que o físico diz nesses textos. Há, no entanto, uma diferença importante sobre o significado que deve ser atribuído àqueles textos. Explico-me.

Ao tratar de propriedades do mundo físico que envolvem características do nosso cotidiano, uma versão das fórmulas matemáticas para a nossa linguagem usual é simples ou, pelo menos, compreensível. Isso envolve fenômenos que ocorrem sob os nossos olhos e que podemos experimentar com os nossos sentidos no dia a dia. Até o final do século XIX, a física foi construída com base em observações feitas na dimensão humana: baixas velocidades; temperatura ambiente, não muito elevada nem muito baixa; fraca intensidade dos campos de interação, quer de natureza gravitacional ou eletromagnética; pequenas pressões.

Comentar as relações matemáticas entre tais fenômenos é factível. Podemos usar a linguagem cotidiana, pois estamos tratando de fenômenos de nossa dimensão, da ordem de grandeza do homem.

Um exemplo simples consiste no comentário de que um gás colocado em um recipiente ocupa todo o seu volume. Pode-se não saber as razões pelas quais isso acontece, mas a frase é compreensível, pois descreve um fenômeno com o qual estamos acostumados.

Sugiro chamar “dialeto newtoniano” essa linguagem que envolve a descrição de fenômenos físicos convencionais, aqueles relacionados à nossa experiência pessoal.

No entanto, quando começamos a penetrar em propriedades muito afastadas desse cotidiano, tendo em vista descrever o micro e o macrocosmos, cujas estranhas propriedades foram reveladas ao longo do século XX, aparecem dificuldades inesperadas. O uso desse “dialeto newtoniano” pode gerar contradições inaceitáveis.

Vamos dar alguns exemplos para que possamos entender essa dificuldade:

- o tique-taque de um relógio em repouso não tem a mesma frequência que o tique-taque de um relógio em movimento;
- para ir de um ponto do espaço a outro, devo passar continuamente por todos os pontos intermediários, mas isso pode não acontecer no microcosmo;
- ao caminhar para o futuro (ou seja, o que normalmente consideramos um movimento no tempo), nos afastamos de nosso passado; isso pode não ser verdade absoluta: poderíamos andar localmente para o futuro e, no entanto, nos aproximar do nosso passado.

Esses exemplos parecem fantasiosos, pois não fazem parte da nossa experiência corporal.

Para perceber essa alteração no relógio, deveríamos atingir uma velocidade fantasticamente grande, próxima da velocidade da luz, que é de 300 mil km/s.

Para observar como se pode ir de um ponto do espaço a outro sem passar pelos pontos intermediários, precisaríamos ter a dimensão dos átomos e seus constituintes, ou seja, da ordem de 0,000.000.000.001 cm.

Para experimentar essa estranha propriedade do tempo que não segue a relação causal convencional, deveríamos estar em um campo gravitacional dotado de características que não podem existir na Terra ou em nossa vizinhança.

Essas estranhezas mostram que os cientistas têm feito descobertas que vão muito além de nossas experiências no cotidiano. Elas parecem estranhas porque acontecem em situações bem distintas das que estamos acostumados.

A imagem que construímos do mundo e a própria linguagem com que a descrevemos dependem de tal modo de nossos corpos, de nossa experiência sensível, que é difícil conciliar essas novidades que a ciência está desvendando com as certezas a partir das quais aquela imagem do mundo se organizou.

Criamos uma representação do que chamamos realidade a partir dos nossos sentidos e a aceitamos desde sempre como única. A física servia de suporte racional para essa descrição. Ao longo do século XX, esse apoio incondicional sofreu profunda alteração. Foi então que se tornou uma delicada tarefa para um físico descrever em linguagem cotidiana as propriedades que não pertencem à nossa experiência sensível.

O que melhor identifica este modo newtoniano de descrever a natureza pode ser resumido em uma única característica, a linearidade. Ao descrevermos processos físicos através de um modo específico – por exemplo, o modo linear –, estamos simplesmente tratando de uma linguagem, de uma representação do mundo. Não deveríamos esperar que a natureza, os diferentes processos que percebemos no mundo e que fazem parte das ciências físicas sejam verdadeiramente lineares.

Demoramos para liberar a natureza de seu suposto comportamento linear. Hesitamos em perceber que aquilo que deveria ser entendido como um modo simples de uma linguagem, um modo simples de descrição, não deveria ser identificado com a natureza. Demoramos a reconhecer na prática o que costumamos aceitar em princípio, isto é, que o mapa não é o território. Assim, ao descrevermos o funcionamento da natureza, fomos levados a aceitar sua suposta linearidade. Atribuímos essa qualidade de linearidade à natureza, não simplesmente à nossa descrição.

O grande passo dado no século XX foi a crítica dessa descrição linear, permitindo à natureza um comportamento mais complexo, não linear. Não estou interessado aqui na razão, de natureza formal, que instituiu a linearidade. Sabemos que é muito difícil formular processos não lineares em linguagem matemática.

Isso permitiu entender essas observações com a ajuda de leis físicas formuladas em um cenário cotidiano que tam-bém servia para identificar, por analogia, o modo como a sociedade humana (e seus processos altamente não lineares) se organizou.

Elaborado de forma paciente e cuidadosa nos últimos quatro séculos, o sistema newtoniano produziu cenários completos e fechados, considerados absolutos, sobre uma miríade de diferentes fenômenos, o que aparentemente lhe garantia universalidade.

Sua análise dos diferentes fenômenos foi tão eficaz, seu sucesso foi tão formidável, que recebeu um privilégio muito especial: para ocupar o lugar central no pensamento ocidental, ninguém lhe cobrou que explicitasse formalmente a sua versão da criação do mundo (a versão técnica baseava-se na ideia de uma interação gravitacional instantânea). Hoje, isso pode parecer incrível, se compararmos seu status com o de outras formas de controle estabelecidas ao longo dos tempos.

Tal omissão não foi pensada como uma falha desse sistema, que seria corrigida depois, mas, ao contrário, como a demonstração de que havíamos conseguido o bom, completo e verdadeiro diálogo com a natureza. Ele anunciava uma nova era na relação homem-natureza, que se consubstanciava na arrogante sentença “*hypothesis non fingo*” [não invento hipóteses], que explicita a desejada ausência de subjetivismos neste esquema. Esta certeza produziu grande efeito sobre o modo de formular as questões que devemos tentar responder, as questões significativas no interior do sistema newtoniano. Mesmo quando, no começo do século XX, os físicos foram obrigados a aceitar profundas mudanças nesse sistema, elas foram entendidas como mudanças internas do sistema newtoniano. Explico-me.

Podemos identificar dois grandes movimentos de mudança associados ao micro e ao macrocosmos (estou pensando na física quântica e na cosmologia). Mas os parâmetros newtonianos de descrição da natureza não foram questionados. Para exemplificar este argumento e caracterizar de modo mais simples o que estou afirmando, podemos considerar um caso particular: o da estrutura básica do espaço e do tempo.

As mudanças que lhes foram impostas não destruíram sua função – imprescindível em todo o discurso newtoniano do mundo –, mas mudaram suas propriedades. Tratava-se de uma correção de rumo e não de uma mudança de objetivo. Em um primeiro momento, a alteração do esquema newtoniano, que afirmava a condição absoluta desta estrutura (espaço e tempo), resultou de uma análise teórico-observacional sobre as propriedades da luz. Como consequência natural da constância da velocidade de propagação da luz, foi necessário aceitar que relógios – máquinas que determinam o ritmo temporal do mundo – não produzem valores iguais a relógios associados, isto é, transportados por diferentes observadores que não estão em repouso uns em relação aos outros.

O efeito dessa mudança foi unificar novamente espaço e tempo, recolocando-os como eram antes da separação imposta pelo programa newtoniano.

Quando a Relatividade Especial demonstrou que relógios funcionam diferentemente, dependendo de suas velocidades, não se cogitou de eliminar de nossa descrição do mundo a estrutura espaço e tempo. Não se acatou a proposta de que esta estrutura deveria ser abandonada. Não! Pensou-se que o que deveria ser mudado eram tão somente os modos de comparar informações mecânicas entre diferentes observadores.

A partir de informações da própria comunidade científica, esse resultado espalhou-se pela sociedade como se fosse uma revolução completa e um afastamento total dos conceitos newtonianos. Toda a análise seguinte, no século XX, parecia mostrar que um imenso salto para a frente nos fazia abandonar o “dialeto” newtoniano, o que veio a se demonstrar falso.

Depois, ocorreu uma nova mudança de rumo no programa newtoniano. Não foi a luz que guiou essa crítica, mas sim a gravitação, também uma força de longo alcance, como a eletromagnética. Além de nos impedir de voar, ela determina o cenário astronômico, afirmando o modo como planetas, estrelas e outros objetos do espaço, próximo

ou longínquo, se organizam. Einstein conseguiu encontrar um modo extremamente engenhoso e prático de associar processos gravitacionais a modificações na estrutura geométrica do espaço-tempo. Em sua análise, o espaço e o tempo deixam de ser um *a priori* de representação para serem associados aos fenômenos gravitacionais, como se pudéssemos descrevê-lo como uma substância estranha e universal.

Por mais profundas que sejam, essas modificações nas propriedades do espaço e do tempo precisam ser separadas do abandono da estrutura espaço-tempo.

Nenhuma dessas duas alterações chegou a questionar a condição associada a esse modo de representação dos fenômenos, um pré-requisito para descrever qualquer fenômeno no “dialeto newtoniano”. Em outras palavras, a ideia de que o “dialeto newtoniano” podia representar corretamente a estrutura básica do mundo não foi questionada.

De modo semelhante, quando, mais tarde, a física quântica mostrou as dificuldades com que nos defrontamos ao tentarmos acompanhar o movimento de um elétron, não se pensou em abandonar o conceito de espaço-tempo. Ao contrário, ele foi afirmado. A solução alternativa (capaz de salvaguardar a estrutura newtoniana) consistiu em transformar a descrição de processos microscópicos numa sutil e complexa modificação, envolvendo probabilidades de eventos e associando perturbações no processo de medida do fenômeno.

Recentemente, a cosmologia quântica – numa ousada, mas ainda incompleta, tentativa de conciliar processos quânticos e gravitacionais – sugeriu que devemos abandonar o conceito primordial de *espaço-tempo*, passando a gerá-lo a partir de outros conceitos ainda insuficientemente compreendidos. Ao penetrar assim na ontologia do espaço-tempo, estaríamos anunciando, de fato, a iminente extinção de um dos pilares do “dialeto newtoniano”.

Para além das questões de caráter estritamente técnico, parece-me que o que nos tem impedido de criticar de forma ampla, severa e profunda o “dialeto newtoniano”, como seria necessário, tem uma origem de natureza totalmente distinta.

O que a ciência apresentou no século XX pode ser visto como uma imensa renovação do antigo movimento copernicano, envolvendo agora a estrutura dos próprios conceitos com os quais tentamos compreender a realidade – o que estamos chamando, simplificada, de “dialeto newtoniano”. Dito de modo mais incisivo: os conceitos convencionais de descrição da realidade não devem ser considerados universais.

A física encontra duras dificuldades ao tentar traduzir o que se passa em um nível para outro da realidade (penso, por exemplo, em “curvas do tipo tempo fechadas”, que conduzem ao passado e exigem uma mudança radical de nossos conceitos temporais, em nível macro, e a física quântica, em nível micro).

Essa questão transcende o território restrito e limitado do conhecimento técnico gerado pela física. Derrama-se, de fato, sobre toda nossa construção racional do mundo. Entretanto, para a maioria dos cientistas, a alternativa que está sendo sugerida – a descrição do mundo por meio de um novo dialeto não newtoniano – ainda aparece hoje como uma alucinação, um possível retrocesso a uma era não científica, com revalorização do transcendental. Não se trata disso. A razão desta reação deve ser procurada no “orgulho da espécie”, em que habita nosso profundo narcisismo. Acrescento um comentário.

Na história da humanidade nos tempos modernos, Freud identificou três grandes alterações, produzidas pela ciência, que diminuíram dramaticamente o orgulho da espécie, com consequências profundas em nossa visão do mundo. São elas:

1. A perda do “centro do mundo”, graças a Copérnico: a Terra se move em volta do Sol;
2. A perda da “formação divina do homem”, graças a Darwin: as espécies se modificam;
3. A perda da crença no poder completo de “razão”, graças a Freud: nossos pensamentos têm raízes no irracional.

Talvez devamos acrescentar uma quarta dificuldade: a não universalidade do modo de descrever a natureza, como mostramos nos exemplos anteriores ao nos referirmos a características fora de nossa experiência cotidiana. Abandonar o “dialeto newtoniano”, reconhecendo que ele não pode ser usado em todos os níveis da realidade, é condição para podermos compreender os domínios que estão fora da nossa percepção sensorial. Desse modo, organizaremos o que chamei de metacosmologia.

5

Modos de descrever acontecimentos no espaço-tempo

Na teoria das representações, aprendemos como identificar boas descrições. Elas exibem as características de um dado fenômeno independentemente do observador, permitindo separar suas propriedades e a linguagem usada para fazer comentários sobre ele.

Ao descrevermos um fenômeno no espaço e no tempo, é condição preliminar que fixemos (arbitrariamente) um sistema de coordenadas, com o qual identificaremos onde e quando um processo ocorre. Assim, a descrição do fenômeno guarda informações sobre o processo no mundo e sobre a escolha particular de coordenadas usadas.

Essa escolha exerceu um importante papel desde os primeiros passos na mecânica clássica dos corpos, pois a simetria de um dado fenômeno induz naturalmente escolhas mais convenientes. Posso usar coordenadas cartesianas para fixar pontos, lugares, na superfície de uma bola, mas é mais conveniente escolher coordenadas esféricas, que tornam essa tarefa mais simples. Para cada fenômeno, existem sistemas de coordenadas mais adaptados que outros.

Esse procedimento foi generalizado para o espaço-tempo da Relatividade Especial de Poincaré-Einstein e mais tarde para a Relatividade Geral de Einstein (ver seção seguinte sobre a questão causal).

Em síntese, uma descrição de um fenômeno só pode ser admitida como verdadeira se contiver características comuns a todos os sistemas de representação, características que devem ser invariantes sob transformações arbitrárias de coordenadas.

Sabendo dessa dificuldade de princípio, os físicos fizeram da análise da representação um importante tópico de sua disciplina. Essa análise obteve um sucesso notável no século XX com o surgimento da Teoria da Relatividade (Especial e Geral), que colocou em evidência um procedimento simples para evitar que a descrição dos fenômenos dependesse do modo de escolha de coordenadas.

Escolha de representação

Além do sistema de coordenadas para obter as boas variáveis, devemos caracterizar a própria estrutura na qual os fenômenos são descritos, ou seja, a arena do espaço-tempo.

Trataremos agora de outra escolha de representação, de natureza diferente. Ela constitui a base do que poderíamos chamar de desconstrução do real.

No primeiro momento, tratou-se da escolha de um conveniente sistema de três coordenadas espaciais. Depois, com a unificação do espaço-tempo, tornaram-se necessárias quatro coordenadas, três espaciais e uma temporal.

Essa escolha substituiu o espaço absoluto e o tempo absoluto newtonianos pelo espaço-tempo absoluto da Teoria da Relatividade Especial, de 1905.

Com a Teoria da Relatividade Geral, em 1915, a própria estrutura do espaço-tempo teve que ser modificada. Passou-se a identificar a geometria do espaço-tempo com toda a informação da interação gravitacional.

Criou-se um paradigma consubstanciado na hipótese de que a origem da estrutura métrica do espaço-tempo deve-se à universalidade da gravitação. Somente essa interação determina a geometria do mundo.

Entretanto, a estrutura métrica do espaço-tempo pode ser alterada em outras representações, seja substituindo forças arbitrárias com as quais escolhemos descrever esse processo via modificação da geometria, seja na questão de transformação de uma dada teoria em outra. Veremos um exemplo particular na Teoria da Relatividade Métrica.

Relatividade Especial

Uma das consequências mais notáveis da Teoria da Relatividade Especial (H. Poincaré e A. Einstein, 1904) foi a substituição de um único tempo comum a todos os corpos por uma infinidade de tempos próprios, um para cada corpo ou observador. A geometria euclidiana tradicional, usada no cotidiano e dominante na física clássica, foi substituída pela geometria de Minkowski, na qual além das três dimensões do espaço acrescenta-se uma dimensão temporal. Nessa descrição, cada observador passa a ter um tempo próprio, e a noção de simultaneidade passa a depender de seu estado de movimento. Essa transformação de um tempo único universal em uma miríade de tempos, um para cada observador, retirou de cena o tempo absoluto newtoniano.

Relatividade Geral

Em um momento posterior, na década de 1920, o aparecimento da Teoria da Relatividade Geral (A. Einstein, 1915), que nada mais é do que uma teoria da gravitação associada à modificação da geometria induzida pela distribuição de matéria e energia, retirou o caráter imutável, rígido e estático da estrutura minkowskiana.

A geometria experimentada por um corpo, aquilo que caracteriza distâncias no espaço e no tempo, adquiriu uma estrutura variável, dependente da interação com outros corpos, ou melhor, dependente da quantidade de matéria e de energia presente. A universalidade da gravitação – isto é, o fato de que todos os corpos sentem a ação da força gravitacional – foi responsável por modificar a geometria do mundo, por reconhecer que toda matéria, tudo o que existe, está imersa em uma única e global estrutura geométrica. O caráter universal da interação gravitacional fixa uma única geometria. Tudo o que existe está mergulhado nessa totalidade espaço-tempo.

Desse modo, a ação da força gravitacional identifica-se com a transformação da geometria pela qual o corpo físico se movimenta. Nesse procedimento, a gravitação é formalmente eliminada, reaparecendo travestida de modificação da geometria. O fenômeno gravitacional passa a ser interpretado como se a força gravitacional não existisse: o movimento de um corpo material é descrito por um caminho livre, mas em um espaço-tempo de geometria variável. Esses caminhos nos quais nenhuma força atua são conhecidos dos matemáticos, que os denominam geodésicas. Assim, pode-se afirmar que a força gravitacional não existe *stricto sensu*, pois foi substituída pela modificação universal (sentida por todos os corpos) da geometria em que o corpo está.

O caminho livre de qualquer força identifica-se com as curvas geodésicas definidas pela geometria. Nesse contexto, pode-se afirmar que um corpo é livre se sobre ele atuam somente o que tradicionalmente chamamos forças gravitacionais.

Recentemente, esse método de eliminar a força gravitacional por uma geometrização especial foi generalizado para poder ser aplicado a todos os tipos de forças na Teoria da Relatividade Métrica (ver E. Bittencourt e M. Novello).

Relatividade Métrica

Na física, afirma-se que um corpo é livre se sobre ele não atuam forças externas. Nesse caso, seu movimento inercial é descrito no espaço-tempo por geodésicas. Mesmo quando observamos em nosso cotidiano um corpo em repouso (em uma determinada referência espacial), ele segue um caminho (uma geodésica) no espaço-tempo quadridimensional, pois a continuidade temporal o exige.

Reconhecemos três leis físicas fundamentais que descrevem completamente todos os movimentos dos corpos que envolvem Teorias da Relatividade. Elas se distinguem pelos qualificativos especial, geral e métrica.

1. Cada coisa, cada observador, possui um tempo próprio, distinto dos demais. Essa propriedade permite organizar uma estrutura métrica quadridimensional espaço-tempo estática, absoluta e única, chamada geometria de Minkowski.

2. A ação de uma força gravitacional, que é universal, pode ser eliminada com a modificação da arena onde o fenômeno ocorre, a geometria de Minkowski, gerando uma nova geometria que controla dinamicamente as distâncias no espaço e no tempo.

3. O método de eliminação da força gravitacional pode ser estendido para qualquer outro tipo de força. Assim, podemos construir uma nova geometria específica para cada corpo.

Um corpo submetido a qualquer força (não gravitacional) não é livre. Tal descrição permitiria caracterizar de modo absoluto o que chamaríamos “liberdade na física”. Muito recentemente, descobriu-se que esse não é o caso e que a noção de “corpo livre” também depende da estrutura métrica do espaço onde esse corpo é descrito. Dito de

outro modo: um corpo submetido a uma força de qualquer tipo em um dado espaço-tempo pode ser descrito, de modo equivalente, como estando livre de qualquer força, desde que ele passe a ser descrito como se estivesse mergulhado em outra geometria específica, dependente das propriedades de movimento do próprio corpo. Isso significa que cada corpo possui a “sua” geometria, na qual o efeito da força externa que sobre ele atua é substituído pelas propriedades da geometria na qual o corpo passa a ser descrito.

À primeira vista, trata-se do mesmo procedimento realizado na Teoria da Relatividade Geral, mas há uma diferença significativa: no caso gravitacional, essa mudança da geometria é universal, ou seja, independe de qualquer característica do corpo em questão, enquanto no caso de um corpo qualquer sujeito a uma força não gravitacional a alteração das distâncias espaçotemporais dependem da dinâmica particular do corpo. Mesmo não tendo um caráter universal, devemos reconhecer que esse procedimento produz um resultado notável: a substituição dos efeitos da aceleração de um corpo sujeito a uma força de qualquer natureza por um caminho geodésico em um espaço-tempo de geometria modificada. O corpo, desprovido de aceleração nessa geometria efetiva, é então considerado como um corpo livre.

Esse mecanismo de transformar a descrição de processos dinâmicos exercidos por forças de qualquer natureza por alterações na geometria por onde o corpo se movimenta é bastante geral e pode ser aplicado a todo tipo de força e a qualquer corpo físico. Esse método é conhecido como Teoria da Relatividade Métrica.

6

A questão causal

A propagação da luz no espaço-tempo (Minkowski) é representada por um cone. A luz percorre a superfície desse cone. Como todo corpo tem velocidade inferior à da luz, o movimento de qualquer objeto nesse espaço-tempo é representado por uma curva que está sempre no interior desse cone.

Ao instaurar uma nova relação causal no mundo a partir da existência de uma velocidade máxima intransponível, os físicos do início do século XX consideraram a proposta da Relatividade Especial como padrão. A extensão desse princípio causal ao Universo foi natural.

Mas eles não tiraram todas as consequências do procedimento descoberto por Gauss na construção de um tempo global. Foi preciso que entrasse em cena outro matemático, Kurt Gödel, para que pudéssemos entender de modo direto que causalidade local não implica causalidade global.

Dito de outro modo: em cada ponto da trajetória de um corpo, pode-se obedecer a regra da Relatividade Especial, caminhando somente no interior do cone de luz local, e, mesmo assim, violar a regra causal globalmente. Pois na presença de um campo gravitacional, descrito pela Teoria da Relatividade Geral, propriedades da geometria causam alterações no cone de luz.

Ou seja, a luz, como tudo o que existe, sofre o efeito gravitacional. Assim, a alteração provocada pela interação gravitacional sobre o cone de luz é capaz de impedir a extensão da causalidade local para todo o espaço-tempo. Nem toda geometria possui essa propriedade. Esse impedimento não aparece, por exemplo, nas geometrias que representam o campo gravitacional de uma estrela ou na cosmologia de Friedmann. Mas essa independência entre a causalidade local e a causalidade global aparece claramente em alguns tipos de campos gravitacionais.

O exemplo mais contundente foi apresentado por Gödel. Vamos examinar sucintamente essa geometria. Ela pode não estar relacionada com o Universo atual, mas mostra certas características importantes se quisermos ir além de um conhecimento superficial da questão causal.

A geometria de Gödel tem como fonte a mesma estrutura da de Einstein, ou seja, matéria constante representada por um fluido perfeito de densidade de energia E além de uma misteriosa constante cosmológica Λ . Em ambos os casos, a geometria é estática, ou seja, independe do tempo. A principal diferença entre elas está nas características cinemáticas da fonte. No caso do modelo cosmológico de Einstein, o fluido está em repouso total; no caso de Gödel, o fluido possui uma rotação local (não se trata de uma rotação da matéria global, pois não existe “lado de fora”): em cada ponto, ele gira com velocidade de rotação constante.

Essa vorticidade dá ao modelo cosmológico de Gödel suas estranhas propriedades. Para tentarmos visualizar um pouco essa estrutura da métrica de Gödel, vamos descrevê-la em um sistema de coordenadas cilíndrico. O leitor interessado em detalhes deve consultar o livro *A máquina do tempo (um olhar científico sobre viagens não convencionais no tempo)* ou, para mais detalhes técnicos, o artigo de Novello, Soares e Tiomno citado nas referências.

Causalidade local na Relatividade Especial

A Teoria da Relatividade Especial alterou a ideia newtoniana de um tempo único absoluto. Em seu lugar, concedeu a cada observador (a cada corpo) um tempo próprio. Isso decorreu da existência de uma velocidade máxima absoluta (a velocidade da luz).

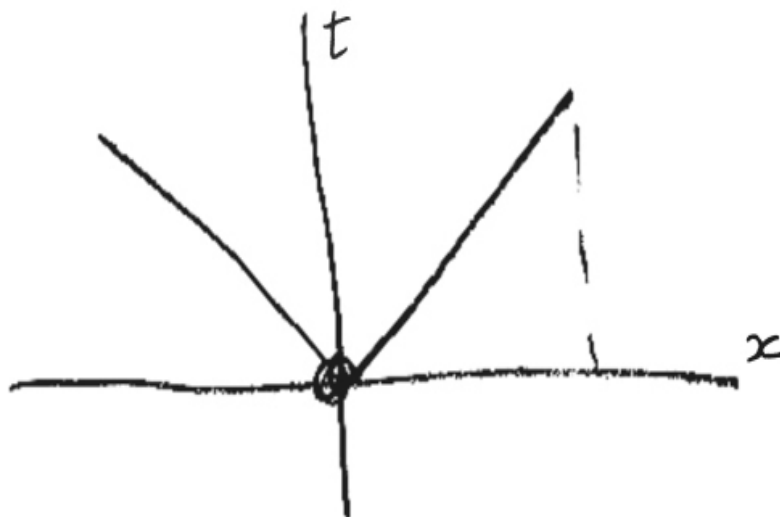


Figura 1. Por convenção, a velocidade da luz é feita igual a 1 nesses gráficos de t contra x . Por isso, a luz se propaga na superfície do cone.

Considerando a velocidade da luz: $c = \Delta x / \Delta t = 1$, o caminho da luz (neste gráfico) é dado pela reta de inclinação 45° . Um gráfico bem simples mostra que todo e qualquer corpo se movimenta com velocidade inferior à da luz. Considerando não somente o plano (t, x) , podemos representar os caminhos da luz por um cone. A luz propaga-se na superfície do cone.

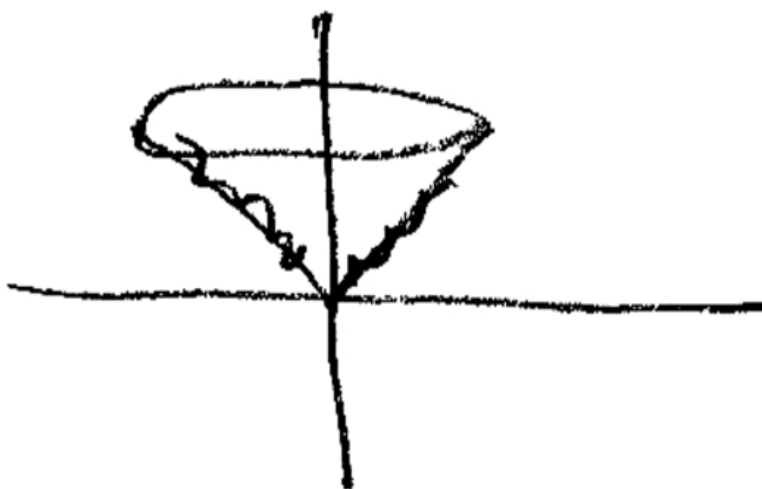


Figura 2

A transformação entre relógios para observadores inerciais é o território em que se estabelece a Relatividade Especial. Uma regra permite comparar esses tempos não idênticos.

Como optamos por descrever os eventos em um cenário quadridimensional (três dimensões de espaço e uma de tempo), passar de uma representação a outra é substituir os valores da caracterização de um fenômeno em x^α ($\alpha = 0, 1, 2, 3$) por outro conjunto $x^{\bar{\alpha}}$, estabelecido por Lorentz, Poincaré e Einstein e sintetizado por este último na Teoria da Relatividade Especial.

A principal novidade dessa descrição espaçotemporal está relacionada ao fato de que a distância entre dois eventos não obedece mais à regra euclidiana tridimensional de ser sempre positiva. Pois, por convenção, a medida do tempo aparece nas fórmulas de distância espaçotemporal com um valor negativo. A fórmula que determina a soma dos quadrados de uma distância espacial na geometria de Euclides se escreve

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2.$$

No espaço-tempo quadridimensional, ela é substituída por outra, na qual o tempo entra com sinal oposto a essas quantidades espaciais, uma possibilidade examinada pelo matemático alemão Bernhard Riemann, que generalizou a expressão da distância entre dois pontos em uma variedade com um número arbitrário e finito de dimensões. No caso da Relatividade Especial (entendida como o limite local, pontual, de qualquer geometria descrita na Relatividade Geral), um desses termos é negativo e os demais são positivos ou vice-versa, isto é, três são negativos e um é positivo. Vamos escolher essa última forma e escrever

$$\Delta s^2 = \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2.$$

Deveria aparecer uma constante à frente do termo temporal para que toda a fórmula tivesse dimensionalidade correta de comprimento ao quadrado. Subentendemos que, por convenção, define-se a velocidade da luz, c , que deveria multiplicar o termo temporal, como tendo o valor unitário.

Assim, reconhecemos três tipos de distâncias, conforme a figura:

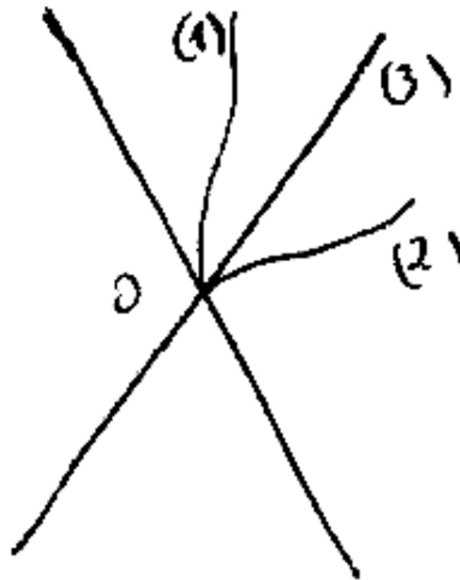


Figura 3

- 01. Distância tipo-tempo;
- 02. Distância tipo-espaco;
- 03. Distância tipo-luz (ou tipo nula).

Assim, os valores das distâncias são, respectivamente,

- $d(01)$ é positiva;
- $d(02)$ é negativa;
- $d(03)$ é nula.

Isso decorre da convenção que fizemos na representação $\{x^a\}$.

Como só admitimos corpos que percorrem caminhos com velocidade menor que a da luz, vemos que estes caminhos são tipo-tempo ($d(01)$).

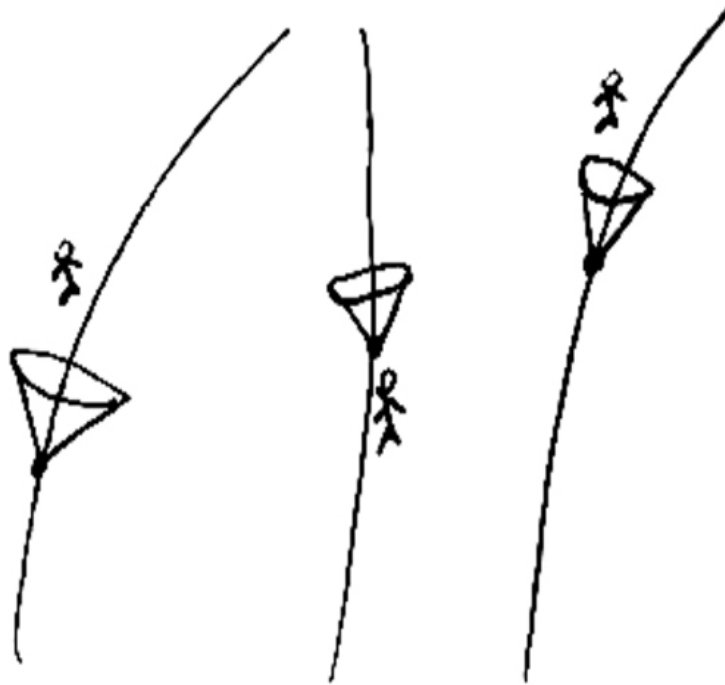


Figura 4. Miríades de observadores com seus correspondentes tempos e suas correspondentes relações causais.

A causalidade é definida, então, com a afirmação de que corpos reais só podem viajar no interior do cone de luz de cada ponto, pois a velocidade de um corpo real é sempre inferior à da luz (que viaja sobre o cone).

É possível coordenar esses tempos e descrever o espaço-tempo com um só tempo? O matemático alemão Carl Friedrich Gauss mostrou que isso é sempre possível, pelo menos em uma região compacta. E em todo o espaço-tempo? Depende de suas propriedades topológicas.

Causalidade global na Relatividade Geral

Em sua primeira descrição da cosmologia, em 1917, Einstein considerou a hipótese de que nosso Universo admite uma tal separação espaço + tempo. Tratava-se de conservar o máximo possível da versão simples contida no cenário newtoniano.

A cosmologia atual manteve essa hipótese. Somente uma exceção notável ocorreu, graças ao matemático Kurt Gödel e a uns poucos seguidores.

Começemos por considerar a hipótese cosmológica da possibilidade de fixarmos um tempo cósmico global, no qual teríamos a seguinte configuração:

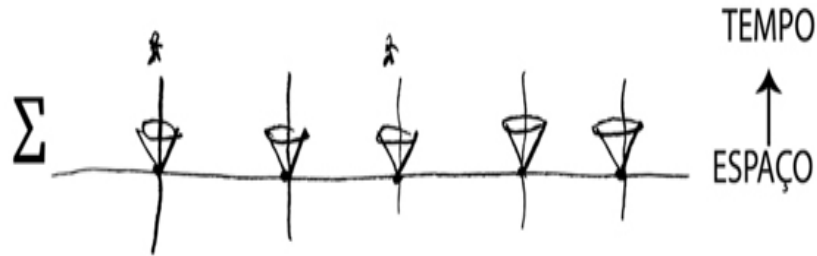


Figura 5. Representação gaussiana nos modelos tipo Friedmann.

Para que essa hipótese seja verdadeira, é necessário examinar o que acontece em todo o espaço-tempo. Gödel argumentou de outra forma e mostrou explicitamente que causalidade local não implica causalidade global.

Note na figura 6 um exemplo simples de contradição com a hipótese do tempo único, no qual um observador, contrariamente ao que a figura anterior sugere, pode cruzar duas vezes uma dada superfície como a $\sim\Sigma$.

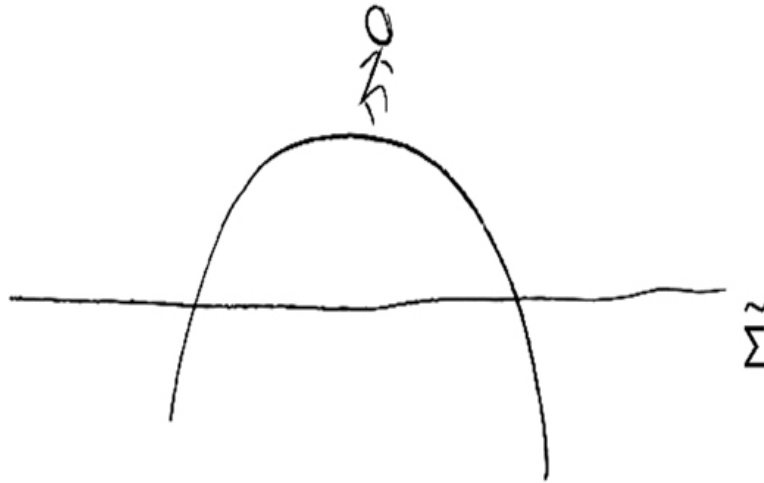


Figura 6

Um observador que cruza duas vezes $\sim\Sigma$ cria um conflito causal, que Gödel descreve de modo claro e simples. A argumentação dele é a seguinte. Como toda forma de energia, a luz também é influenciada por um campo gravitacional. A luz pesa, isto é, a gravitação altera a sua propagação. Pode-se então imaginar uma situação na qual essa propagação permite a estranha configuração (ver figura 7) em que um observador passa mais de uma vez através dessa superfície $\sim\Sigma$.

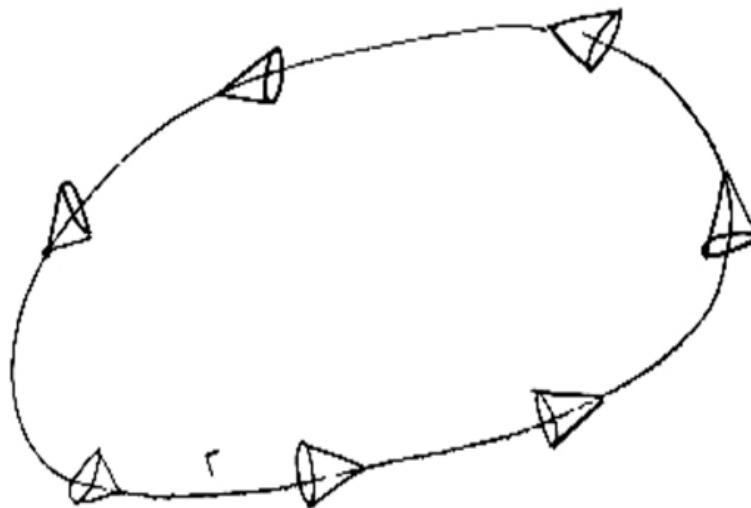


Figura 7

Se a curva Γ da figura 7 do tipo-tempo é fechada, então:

1. Localmente, o observador que caminha sobre ela afirma a validade causal, isto é, ele sempre caminha para seu futuro local;
2. Globalmente, a curva se fecha sobre si mesma, ou seja, passa duas vezes pelo mesmo ponto no espaço-tempo. Trata-se de uma violação da relação causal global.

Gödel mostrou que esses caminhos existem em algumas geometrias permitidas pela Relatividade Geral, geometrias que satisfazem as equações dessa teoria. Mais tarde, foram encontradas outras geometrias com propriedade análoga, algumas delas tendo dependência temporal, isto é, não sendo estáticas como a geometria de Gödel.

Comentário adicional: em todas as geometrias conhecidas que possuem essa propriedade gödeliana, os observadores fundamentais (isto é, aqueles que se movimentam ao longo dos caminhos determinados pela fonte dessas geometrias) possuem rotação (vorticidade). Parece que a rotação é uma característica facilitadora da presença de curvas tipo-tempo fechadas (CTC, em sua sigla em inglês).

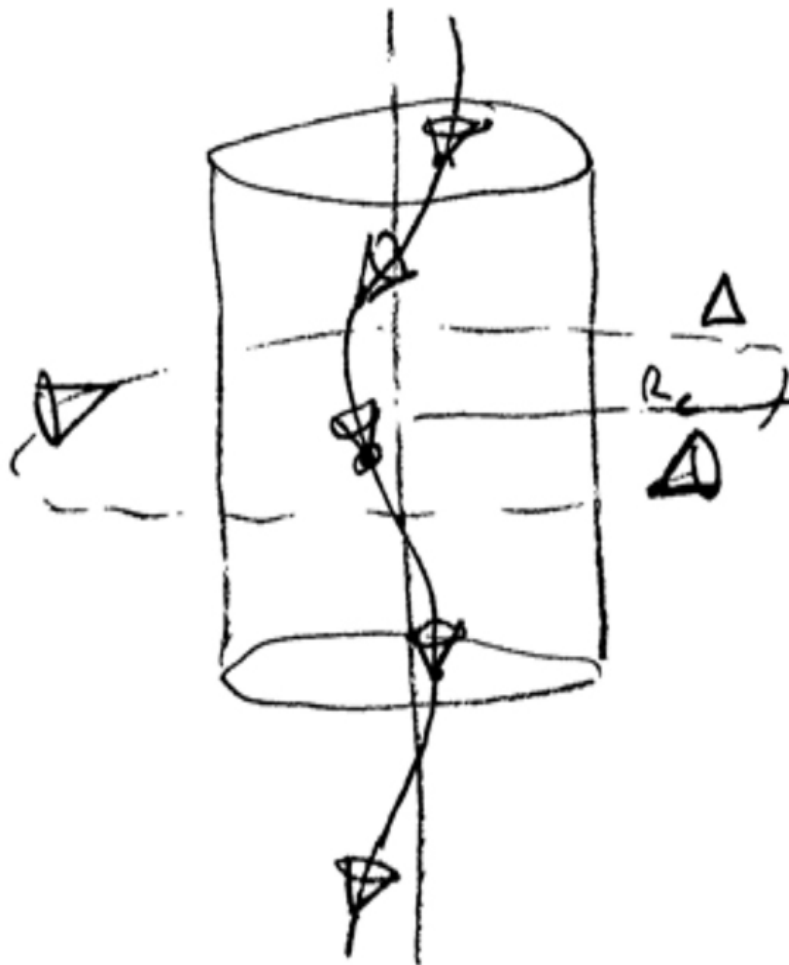


Figura 8

Como exemplo das ideias de Gauss, é possível exibir uma propriedade notável dessa geometria de Gödel (bem como de outras, exibindo CTC). Vamos representar a geometria de Gödel em um sistema de coordenadas cilíndrico, como na figura 8. É possível mostrar que existe um raio crítico R_c a partir de um ponto dessa geometria (em verdade, de qualquer ponto, pois ela é homogênea), tal que em seu interior a representação gaussiana de tempo único seja válida. Somente para além de R_c é possível existir uma curva fechada tipo-tempo. Encontramos aqui um exemplo da afirmação de Gauss: em qualquer geometria, sempre é possível construir um sistema de coordenadas (gaussiano) com um tempo único válido no domínio compacto R_c .

Quantum (o mundo da microfísica)

O microcosmo, o interior da matéria, passou a ser descrito pela teoria quântica a partir das primeiras décadas do século XX.

O principal interesse deste livro não é tratar dessa teoria, mas o estudo da cosmologia fica incompleto se não tivermos uma ideia do que se passa no mundo microscópico. Precisamos falar do *quantum*. Eu me limitarei ao mínimo necessário para que possamos entender algumas questões da cosmologia que, inevitavelmente, relacionam o macro e o micro.

Princípio da incerteza (Heisenberg)

Talvez o conceito mais estranho da teoria quântica, estabelecido no mundo microscópico, seja o princípio de Heisenberg, dito da incerteza.

Certas quantidades na física, como a posição de um corpo e sua velocidade não podem ser determinadas com precisão absoluta em uma medida. Isso é caracterizado pela relação

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h.$$

Simplificadamente, podemos associar Δq e Δp aos erros nas medidas da posição e da velocidade de um corpo. Em um mesmo momento t , não é possível conhecer com precisão a posição e a velocidade de um corpo.

Uma fórmula análoga (que usaremos no fenômeno de criação de partículas) envolve a energia e o tempo sob a expressão

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h.$$

Há uma sutil diferença entre esta e a fórmula anterior. Enquanto a primeira refere-se a medidas efetuadas em um mesmo tempo t , aqui se trata de medidas da energia efetuadas em dois tempos distintos, t_1 e t_2 , onde Δt é a diferença entre t_1 e t_2 e onde o sistema tem energias E_1 e E_2 , respectivamente.

Essas questões da teoria quântica parecem indicar que ela diz respeito a uma interação do observador com o fenômeno observado. Essa relação sempre foi enfatizada no mundo microscópico e identificada como a verdadeira característica do mundo quântico. No entanto, se pensarmos em aplicar conceitos quânticos ao Universo como um todo, essa ênfase na medida realizada por um observador torna-se completamente sem sentido, pois não podemos aceitar a existência de um observador externo ao próprio Universo. Deixarei essa questão para outro momento. Só enfatizo aqui a importância da contribuição à cosmologia dada pelo físico inglês-brasileiro David Bohm, que desenvolveu as ideias de Louis de Broglie em sua crítica à famosa interpretação de Copenhague, restringindo o papel do observador.

Os mistérios da teoria quântica estão em boa parte relacionados à dificuldade de se traduzir a linguagem matemática usada em sua descrição para os hábitos de pensamento convencionais, com os quais lidamos em nosso mundo newtoniano. Há outra sutileza, que cito brevemente para não me afastar em demasia do nosso objetivo aqui. A formulação de Bohm, que usa termos convencionais da mecânica para descrever o mundo quântico (em particular, eliminando o papel central do observador, o que é crucial se nos dispusermos a construir uma investigação quântica do Universo), propõe alterações na geometria do espaço-tempo de um modo distinto da teoria da gravitação na Relatividade Geral. Essa geometria não é mais aquela proposta por Riemann, mas sim uma

generalização construída por Herman Weyl. Nessa interpretação, os estranhos aspectos do mundo quântico estariam associados a uma mudança da geometria que ocorreria no microcosmo. As propriedades que a Relatividade Geral mostrou ao descrever a interação gravitacional como uma alteração da geometria teria uma analogia no mundo quântico. Isso não o torna menos hermético, mas aponta um caminho de uma interpretação mais compreensível. O leitor interessado nessa interpretação do mundo quântico associada à geometria de Weyl pode consultar a referência M. Novello, J. M. Salim e F. T. Falciano.

Vácuo quântico

Vou repetir aqui uma anedota que o cientista russo Ya. B. Zeldovich gostava de contar em uma tentativa popular de descrever o vácuo quântico e que citei em meu livro *O que é cosmologia*.

Um jovem entra em uma lanchonete e pede um sorvete. O dono lhe pergunta: “Que cobertura o senhor deseja?” “Nenhuma, não quero cobertura, só o sorvete de baunilha”, retruca o rapaz. “Sim”, continua o dono, “entendo; mas qual cobertura o senhor não quer que eu coloque em seu sorvete: o senhor não quer cobertura de marshmallow ou não quer cobertura de chocolate?”

Essa anedota exemplifica bem a descrição do vácuo: ele só pode ser definido em relação a certo espectro de estados possíveis, dos quais o vácuo é um caso particular. Não é possível definir o vazio absoluto sem referência a possíveis estados físicos acessíveis. Isto é, ao tratar o vazio como um estado realizável, é preciso *a priori* introduzir uma ordem formal na qual outros estados fisicamente possíveis poderiam ser ocupados. Segue-se então que a questão da instabilidade do vácuo só pode ser efetivamente examinada à luz de um dado modelo físico.

Alguém poderia imaginar que a questão da estabilidade do vácuo deveria admitir uma resposta absoluta, se examinada em relação a todas as teorias acessíveis. Deixo para o leitor a tarefa de examinar as dificuldades formais que tal definição contém. Acrescento aqui somente um comentário sobre a inevitabilidade, neste último caso, de se cair em algum tipo de armadilha formal, típica de estruturas totalizantes, como evidenciada por Gödel em sua análise da não demonstrabilidade da autocoerência de sistemas lógicos.

A versão quântica do mundo requer interpretar cada partícula como nada mais do que a condensação localizada de um campo. Assim, em vez de pensar o elétron como uma partícula simples, sua versão quântica o identifica com um campo (o campo spinorial do elétron). Aquilo que chamamos elétron é a condensação localizada desse campo.

Classicamente, o vácuo é uma estrutura desinteressante. É sinônimo de ausência de estruturas, de leis, de simetrias, de teoria. Mas, do ponto de vista quântico, o vácuo é uma estrutura notável, rica de conteúdo. A formulação padrão da teoria quântica de campos – que controla o mundo microscópico – anuncia que toda matéria pode ser entendida como operações formais sobre o vácuo.

Isto se aplica não somente a uma classe de partículas, mas a todos os campos da física, a todas as partículas e, possivelmente, até mesmo ao campo gravitacional.

Na Teoria da Relatividade Geral, o efeito gravitacional da matéria é sentido pela flutuação da curvatura do espaço-tempo. Assim, o vazio completo, clássico, deve ser entendido como ausência de matéria e ausência de curvatura do espaço-tempo, ou seja, da configuração chamada espaço-tempo de Minkowski, típico da Relatividade Especial.

Precisamos examinar a estabilidade desse estado fundamental que chamamos vazio completo (de matéria e geometria). É um longo caminho. Entretanto, como dizia um líder político do século passado, um caminho de 100 léguas começa com o primeiro passo. Vamos então começar lentamente este exame.

Começemos por notar que, como o vácuo, típico para cada campo ou partícula, é ausência de matéria, deveríamos esperar (segundo a nossa percepção clássica do mundo) que este estado de vácuo de um campo arbitrário tivesse energia zero. A história é diferente. Este vácuo possui flutuações, que podem ser descritas como uma distribuição de energia que se identifica com a constante cosmológica, uma conexão inesperada e com consequências importantes em cosmologia. O vácuo tem uma distribuição de energia típica de um fluido perfeito, no qual a pressão P e a densidade de energia E estão linearmente relacionadas

$$P = w E,$$

onde w é uma constante. Nos fluidos conhecidos, essa constante varia entre zero (0) e um (1). No caso do vácuo, essa constante tem o valor particular de menos um (-1).

As famílias de partículas

Os físicos organizaram as diferentes formas de matéria em termos de uns poucos constituintes, diversas classes chamadas *bárions*, *léptons*, *fótons*, *glúons*, *mésons vetoriais* e Λ . Exemplos de bárions são o próton e o nêutron; exemplos de léptons são o elétron e o neutrino. As demais partículas, que não pertencem a essas duas famílias, servem para intermediar as diferentes interações. Os fótons intermedeiam a interação eletromagnética; os glúons intermedeiam as interações fortes e os mésons vetoriais intermedeiam as interações fracas (de Fermi). A constante Λ representa as características do vácuo quântico. Toda a matéria/energia do Universo é constituída por esses componentes básicos.

A condição elementar de prótons, nêutrons e outras partículas do mundo bariônico passou a ser questionada quando eles começaram a ser descritos como constituídos por quarks, estruturas ainda mais elementares.

Interação como troca de partículas

O ponto de vista moderno (isto é, quântico) substituiu a imagem tradicional do campo de força pela visualização da interação como troca de partículas. Mostramos a seguir algumas figuras de partículas em interação, como, por exemplo, dois elétrons interagindo pela troca de fótons.



Figura 9. Interação de partículas carregadas com troca de fótons, o intermediário da interação eletromagnética.



Figura 10. Um elétron encontra um neutrino e eles se transformam em um bóson vetorial de carga negativa, que, por sua vez, se transforma no par elétron e neutrino.

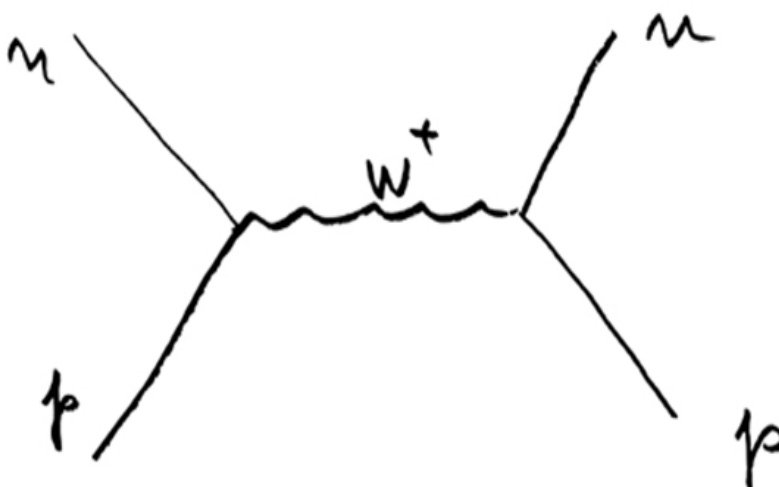


Figura 11. Um nêutron encontra um próton. Ambos geram um bóson vetorial carregado positivamente, que, por sua vez, se transforma no par nêutron e próton.

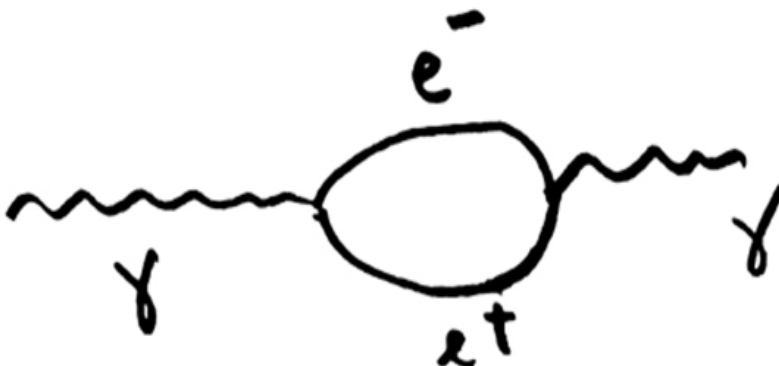


Figura 12. Um fóton com energia suficiente (duas vezes a massa do elétron vezes a velocidade da luz $E = mc^2$) gera um par elétron e pósitron, que imediatamente se aniquilam.

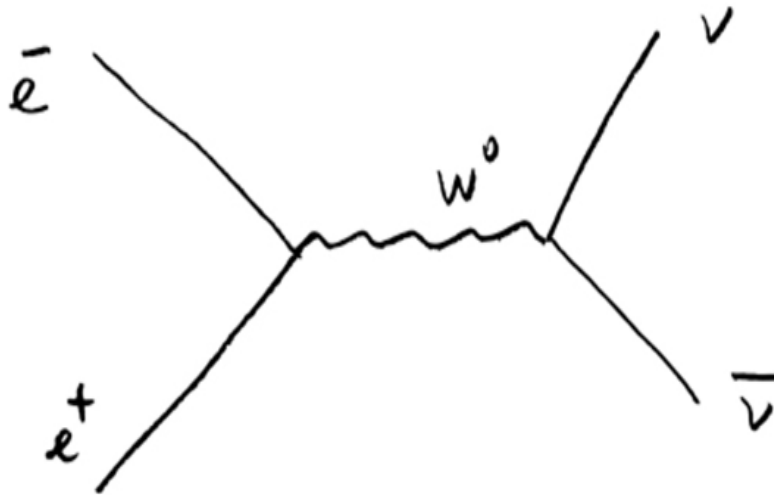


Figura 13. Dois elétrons transformam-se em um bóson vetorial, que, por sua vez, gera um par de neutrino e antineutrino.

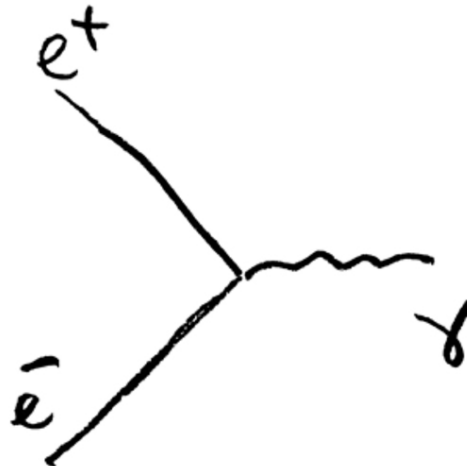


Figura 14. Um elétron interage com um antielétron (pósitron). Eles aniquilam-se, gerando um fóton.

Leis de conservação

Nosso conhecimento da natureza está consubstanciado em certas leis de conservação, como a da matéria, a da energia e outras.

Nos laboratórios terrestres onde se pode observar diretamente interação de partículas, o número de bárions e de léptons são conservados, de forma independente, em todo o processo físico.

Bárions são os componentes importantes do núcleo atômico, o próton e o nêutron. Léptons são partículas como o elétron e o neutrino. À matéria bariônica designa-se um valor positivo 1; à antimatéria, como o antipróton, designa-se um valor negativo -1 . Correspondentemente, na matéria leptônica, o elétron tem número leptônico 1 e o antineutrino tem número leptônico -1 .

Por exemplo, considere a desintegração do nêutron que decai em próton, elétron e antineutrino. No começo, temos uma só partícula, o nêutron, cujo número bariônico N_b é 1. Depois do processo, temos um próton (que possui $N_b = 1$), um elétron (cujo número leptônico é 1) e um antineutrino (que tem número leptônico negativo, -1). Tanto o número bariônico quanto o leptônico são conservados.

Todo processo físico realizado em laboratórios terrestres obedece às leis de conservação dos números bariônico e leptônico. No entanto, nosso Universo é constituído basicamente de matéria, praticamente sem antimatéria.

Não estaríamos aqui se não houvesse esse enorme desbalanceamento, pois matéria e antimatéria possuem uma atração fatal, aniquilando-se e transformando-se em energia de radiação, fótons.

Por que a simetria perfeita, observada nos laboratórios terrestres, não se revela no Universo? Onde foi parar a antimatéria?

Dependência cósmica das interações em um Universo dinâmico

Na década de 1970, a física de partículas teve um desenvolvimento notável com a proposta de unificação das interações fraca e eletromagnéticas. Não se tratava da mesma forma de unificação que, no século XIX, resumiu as forças elétricas e magnéticas em uma só, a interação eletromagnética. No caso das forças fraca (de Fermi) e das eletromagnéticas, a união foi formal.

Enquanto a interação eletromagnética precisa de uma partícula de massa nula – e, por isso, de alcance infinito – como intermediária, as forças de Fermi são de curto alcance. Seus intermediários são campos massivos. Graças ao físico japonês Hideki Yukawa, estabeleceu-se que o alcance da interação é inversamente proporcional à massa da partícula intermediária. Podemos entender, então, o alcance infinito do campo eletromagnético, pois a massa do fóton é zero. Entendemos também que a partícula pesada méson π , descoberta pelo físico brasileiro Cesar Lattes e por outros, intermedeia as interações nucleares de curto alcance.

A interação de Fermi tem outra propriedade muito especial, que também serve de exemplo para a extrapolação indevida da física que acontece diante dos nossos olhos, a física da dimensão humana.

A interação eletromagnética é invariante por transformação de paridade, isto é, por inversão espacial. Dito de outro modo, a força eletromagnética tem a mesma estrutura do lado de cá ou do lado de lá de um espelho, independentemente da orientação que define o espaço.

No decaimento da matéria, via processo de Fermi, a interação viola a paridade, como quando o nêutron decai em próton, elétron e antineutrino:

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}.$$

Ou seja, ela troca de sinal quando a orientação do espaço é invertida.

A importância desse decaimento relaciona-se à abundância dos elementos químicos leves no Universo.

Nos momentos de máxima concentração do Universo existem fótons, nêutrons e prótons. A abundância desses elementos depende somente da sua massa e da temperatura. Hoje, o Universo contém basicamente hidrogênio e hélio. A presença dos demais elementos é pequena, pois eles se formam no interior quente das estrelas. Mas o hélio é formado nas regiões extremamente condensadas do Universo por reações que envolvem o decaimento do nêutron pela interação de Fermi. É aqui que a dependência cósmica dessa interação se faz sentir.

A origem dos bárions primordiais (prótons e nêutrons) ainda é desconhecida (examinaremos algumas propostas de explicação). Como eles são compostos de partículas mais elementares (os quarks), a questão depende de como se formam esses quarks.

Aceitando-se a existência primordial dos bárions, é possível mostrar que o elemento químico mais estável, o hélio, é abundantemente produzido no que se chama nucleossíntese primordial.

Assim, a partir dessa fase extremamente condensada (independentemente de a geometria ser ou não ser singular), o Universo passa a conter hidrogênio e hélio. Os demais elementos são produzidos basicamente no interior das estrelas quentes. A desintegração do nêutron (elemento primordial, como o próton) controla a abundância do hidrogênio e do hélio.

Ou seja, o modo de desintegração da matéria (no caso, o nêutron) controla todo o processo.

Aqui entra em cena um artigo de 1971 [Novello e Rotelli], baseado em um seminário que apresentei no International Centre for Theoretical Physics (Trieste, Itália), sugerindo que esses processos fracos podem depender da intensidade da curvatura do espaço-tempo, ou seja, podem variar com o tempo cósmico.

Essa dependência seria função da curvatura do espaço-tempo e apareceria principalmente nos primórdios da atual fase de expansão. Ou seja, ela influenciaria a produção de elementos químicos leves, como hidrogênio e hélio

– precisamente, os elementos mais abundantes no Universo.

Onde foi parar a antimatéria?

A generalização simetria partícula-antipartícula e a conservação do número bariônico criam um problema para uma descrição da matéria no Universo, que é exatamente a pergunta que fazemos nesta seção. Dedicaremos umas poucas palavras à solução proposta pelo físico soviético Andrei Sakharov, na década de 1960, para explicar o desbalanceamento entre matéria e antimatéria no Universo.

Segundo ele, a lei de conservação do número bariônico não sobrevive em um campo gravitacional muito elevado, como o que ocorreu nos momentos iniciais da atual fase de expansão do Universo. Isso significa que essa lei varia com a intensidade do campo gravitacional, ou, equivalentemente, depende do tempo cósmico.

O programa de Sakharov requer que, em certo período da história do Universo, deve ter ocorrido uma violação da lei de conservação do número bariônico. Sakharov sugere que o lugar natural para esse efeito foi o momento de máxima contração do Universo. Ele pode ser identificado com o começo de tudo, no cenário Big Bang, ou como um simples momento de passagem entre duas fases da dinâmica de evolução do Universo, no cenário de um Universo eterno. Resta a questão: como isso ocorreu?

Maximons e a inversão temporal de um Universo oscilante

Durante o verão de 1971, no International Centre for Theoretical Physics na cidade italiana de Trieste, o físico M. A. Markov apresentou novidades que tratavam de dois mundos, entendidos como totalmente independentes: o Universo em sua grandiosidade e o mundo da microfísica. Suas palestras transformaram-se em um verdadeiro curso intensivo, cujo título despertou enorme curiosidade: “Cosmologia e partículas elementares”.

Ele apresentou uma proposta extremamente ousada: a possibilidade de existência de partículas que chamou *friedmons*, em homenagem ao cosmólogo A. Friedmann, que construiu a primeira solução analítica para as equações da Relatividade Geral, representando um Universo dinâmico em expansão.

[illegible]

Sakharov usou essa fórmula, argumentando que, em uma fase anterior de contração do Universo, a presença desses *friedmons* extremamente pesados provocaria um desequilíbrio termodinâmico e um excesso de antiquarks. Posteriormente, ao passar por um *bouncing* singular, eles decairiam, produzindo um excesso de quarks na atual fase de expansão do Universo. A hipótese maior, que daria sentido a essa proposta, reside na aceitação de que globalmente o Universo é invariante para as transformações unidas CPT, ou seja, inversão da carga (C), inversão espacial (P) e inversão temporal (T). Assim, um excesso de antimatéria em uma fase colapsante do Universo se transformaria em um excesso de matéria na fase de expansão.

Um modelo tão simples enfrenta uma enorme dificuldade, a saber, a existência da singularidade cósmica. Pois sua presença, que implica valores infinitos para quantidades fisicamente relevantes como a densidade de energia e a temperatura ambiente, apagaria toda informação de uma eventual fase colapsante no Universo primordial. Isso sem pensarmos na questão da origem do desbalanceamento inicial favorecendo a antimatéria (que deveria, nesse cenário, ser entendida como uma condição inicial no infinito temporal passado).

No modelo de Sakharov, o excesso de matéria sobre antimatéria no Universo dependeu de vários fatores, entre os quais principalmente a violação da conservação do número bariônico N , que mede a diferença entre os bárions e os antibárions. Os bárions, como prótons e nêutrons, constituem os tijolos básicos da matéria. Uma das leis mais fundamentais no mundo quântico estabelece que todos os processos que podem ocorrer na natureza devem preservar o número total N obtido pelo número de bárions menos o número de antibárions existentes no Universo. Vimos que, quando o nêutron se desintegra, dá origem a um próton e a duas outras partículas (elétron e neutrino), que não são bárions. Ou seja, havia um bárion (o nêutron) e depois da desintegração ainda resta somente um bárion (o próton). A única função das outras partículas é compatibilizar outras características do fenômeno, como, por exemplo, preservar a conservação da energia.

Sakharov argumentou que, na história do Universo, em algum momento devem ter ocorrido processos que permitiram a violação momentânea dessa regra fundamental, a da preservação de N . Os físicos aceitaram essa argumentação como um caminho para explicar a assimetria matéria-antimatéria observada no Universo.

A questão seguinte passa a ser: quando essa violação pode ter ocorrido? Para Sakharov, só nos momentos iniciais da atual fase de expansão, quando o Universo estava submetido a um campo gravitacional fantasticamente intenso. Esse processo seria mais compreensível se o Universo tivesse passado por uma fase colapsante anterior. Devemos lembrar que naquele momento se considerava verdadeira a ideia simplista de que o Universo teria começado em um evento “explosivo”, o chamado cenário Big Bang.

Naquela década (1960), não se conhecia nenhum modelo cosmológico oscilante que satisfizesse as equações da Teoria da Relatividade Geral e tivesse uma forma analítica exata para sua geometria, representando um Universo com uma fase colapsante primordial que, depois de passar por um momento único de máxima condensação e realizar um *bouncing*, entraria na atual fase de expansão. Independentemente da construção desse cenário completo, mas acreditando em sua intuição, Sakharov imaginou que o Universo poderia ser oscilante, mesmo passando por um ponto singular, o que em termos formais é uma contradição. Foi necessário esperar uma década para que cosmólogos da antiga União Soviética e do Brasil conseguissem construir formalmente cenários não singulares de um Universo eterno. Curiosamente, o cenário Big Bang continuou hegemônico por mais duas décadas.

Ao reconhecermos o papel crucial da gravitação nas alterações das leis físicas, como no caso de não conservação do número bariônico no Universo, exibe-se explicitamente a dependência da lei em relação ao tempo. Ou seja, ao introduzir efeitos gravitacionais em diferentes processos físicos altera-se profundamente o modo de se entender a dependência temporal das leis da física, que então devem ser pensadas como dependentes da evolução do Universo.

Esse papel crucial da gravitação como geradora da quebra de simetrias no mundo microscópico foi deixado de lado por um bom tempo. Embora aceito, o princípio de acoplamento não mínimo (isto é, a dependência da interação gravitacional em relação à curvatura do espaço-tempo) foi considerado excepcional e não muito comum. Recentemente, o papel atribuído por Sakharov à gravitação para explicar o desbalanceamento entre matéria e antimatéria no Universo voltou a ser considerado [ver, por exemplo o artigo de Antunes, Bediaga e Novello no *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* (2019), que complementa a proposta de Sakharov sobre a formação do excesso de número bariônico no Universo].

Não linearidade do eletromagnetismo sob influência cósmica

Vimos como teorias não lineares podem admitir configurações semelhantes à de uma constante cosmológica. É preciso notar que um processo semelhante e inverso também pode ocorrer. Explico. Assim como uma estrutura de campo eletromagnética gera um efeito cósmico como Λ , a influência inversa do cosmos é a responsável pela não linearidade do eletromagnetismo. Ou seja, aparece um efeito *bootstrap* [Ver artigo de Novello e Ducap em 2017].

Isso me leva a um comentário pessoal. Em minha longa carreira no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), tive a felicidade de ter tido brilhantes alunos que fizeram teses comigo e tornaram-se meus colaboradores. O último deles foi o jovem Carlos Ducap. Em sua tese de doutoramento, Carlos desenvolveu a ideia de que, assim como Mach havia sugerido que as massas de todas as partículas têm origem cósmica, essa influência também deveria estar presente na transformação das teorias lineares em teorias não lineares. Essa proposta foi completada em relação ao eletromagnetismo. Sua morte súbita no começo de 2020 impediu que continuasse uma carreira que se mostrava brilhante. Faço esse comentário extemporâneo aqui porque quero lhe prestar uma muito merecida homenagem.

Efeitos cosmológicos sobre a física local

Do que estamos examinando neste texto, podemos destacar alguns exemplos que exibem essa interação local-global:

1. Dependência cósmica das constantes da física;

2. Dependência cósmica das interações;
3. Não linearidade do eletromagnetismo sob influência cósmica;
4. Causalidade local e causalidade global.

Múltiplas aparências no microcosmo

Laboratório terrestre. Um físico descreve o resultado de uma experiência que singulariza o elétron e seu oposto, o antielétron. Outro, observando a mesma experiência, afirma que se trata do fóton.

Ao falar do par de opostos elétron-antielétron, estamos falando do fóton? Ambos os modos de descrever a mesma experiência estão corretos?

Sabemos que o fóton é um grão elementar de luz, energia condensada, associada a uma alta frequência de oscilação e a um pequeno comprimento de onda eletromagnética. Pura radiação.

Elétron e pósitron (outro nome do antielétron) são corpúsculos materiais. Têm massa e carga elétrica. O fóton não tem massa nem carga.

Qual a dificuldade de distingui-los? Como podemos dar sentido àquela questão inicial? Mais importante: qual a origem da questão?

Chamar de fóton o par elétron-antielétron enfatiza a característica de momento, mas não especifica a duração, a estabilidade dessa igualdade.

O fóton é ele e seu entorno. Em um campo de forças (gravitacional, eletromagnética), esse par virtual pode se tornar real. Pode-se criar matéria.

A característica que leva certa forma de energia a ser ora fóton, ora o par elétron-antielétron depende da energia disponível.

Por exemplo, nas fases iniciais da atual expansão do Universo, a temperatura ambiente era extremamente alta. A energia disponível era fantasticamente grande. Isso implicava que o fóton e o par elétron-antielétron estavam em permanente mutação, transformando-se um no outro.

Esse equilíbrio dinâmico, essa transmutação do par de matéria em radiação de fótons e vice-versa, continua acontecendo até o momento em que o fóton não tenha mais energia suficiente para se apresentar como o par elétron-antielétron.

Essa perda de energia decorre da expansão do volume do espaço. A temperatura ambiente, que disponibiliza a energia, diminui com essa expansão. Quando ela desce a níveis inferiores a certo valor, aquele equilíbrio e a aparente hesitação da energia, ora como fóton, ora como par elétron-antielétron, não podem mais ocorrer. Esse valor é bem conhecido: trata-se de, no mínimo, duas vezes a massa do elétron. Quando a energia do fóton, isto é, a temperatura ambiente do Universo, cai abaixo desse valor, aquela troca deixa de ser possível. Então, cada um – o par elétron-antielétron, assim como o fóton – pode ser descrito sem ambiguidade.

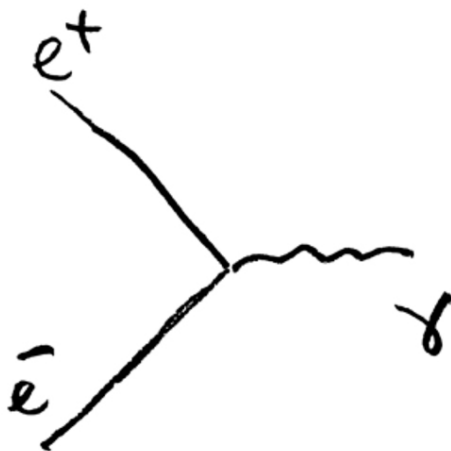


Figura 15. Um elétron interage com um antielétron (pósitron). Eles aniquilam-se, gerando um fóton.

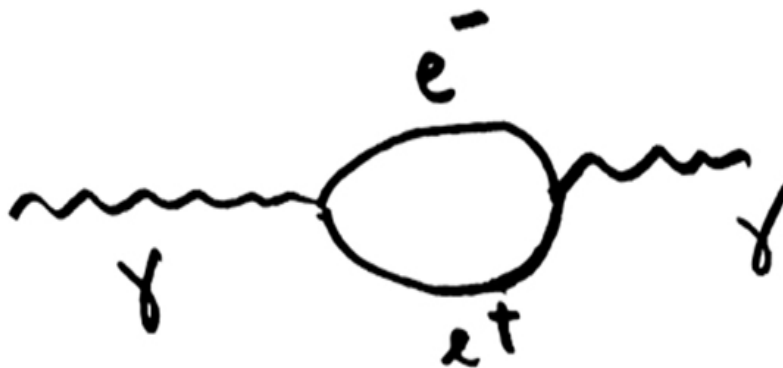


Figura 16. Um fóton com energia suficiente (duas vezes a massa do elétron vezes a velocidade da luz $E = mc^2$) gera um par elétron e pósitron. Ambos aniquilam-se imediatamente em um fóton.

9

Virtual e real

Em seu caminho, uma partícula carregada eletricamente – digamos, um elétron – pode emitir um fóton e logo em seguida absorvê-lo, repetindo essa configuração um sem-número de vezes. Esse fóton não se separa do elétron, pois é virtual. Não é observado, ocorre somente como uma espécie de solilóquio dinâmico. É consequência formal da descrição que fazemos de processos eletromagnéticos no mundo quântico.



Figura 17

Aparece a questão: esse fóton virtual existe? Dito de outro modo, podemos atribuir a condição de existência a esse fóton virtual ou a outras partículas virtuais que aparecem internamente como um processo quântico semelhante a esse, mas que não são observadas por uma experimentação que o singularizaria? Elas integram a descrição que a teoria quântica permite, mas será isso suficiente para responder à questão sobre se elas existem?

A física newtoniana, que trata de processos na dimensão humana, responde de modo simples e direto a essa questão. Entretanto, não devemos esperar que a física moderna seja capaz de estabelecer uma hierarquia existencial absoluta entre o real e o virtual.

Ao observarmos o movimento dos corpos, aparecem limitações impostas pela Teoria da Relatividade Especial. Nos momentos de enorme condensação, nos primórdios da atual fase de expansão do Universo, a intensidade do campo gravitacional também apresenta novidades que estão além do nosso cotidiano, com violação de certas leis fundamentais da física terrestre.

A virtualidade no mundo das partículas elementares mostra que devemos aceitar a existência de níveis distintos de realidade. Ou, poderíamos dizer, de permanência no real. Por exemplo, quando um fóton se transfigura em elétron e antieletron, esse par é virtual, o que significa que eles não precisam obedecer às leis da física às quais toda matéria-energia deve se subordinar. Essa liberdade que um processo virtual adquire (por ser virtual) marca uma fronteira entre existência real e existência virtual.

No entanto, essa virtualidade pode exercer uma ação sobre corpos reais. Um exemplo notável é a presença de efeitos não lineares na interação eletromagnética por causa do aparecimento de processos virtuais.

Então, somos levados a pensar em camadas do real e do virtual como territórios semelhantes, mas não iguais, distinguidos pela observação.

Em resumo, fora do cotidiano, longe das coisas e dos fenômenos descritos na física newtoniana, que organiza nossa realidade imediata, a ciência moderna, ao avançar em sua descrição da natureza no microcosmos (domínio do mundo quântico) e no Universo profundo (momentos de extrema condensação do cosmos) bloqueia, inibe, impede a caracterização do significado único que gostaríamos de atribuir à palavra “existir”.

A questão cosmológica: dos múltiplos tempos da física ao tempo único da cosmologia

Temos que voltar a falar do tempo.

No começo dessa nossa caminhada, algumas escolhas devem ser feitas. São escolhas arbitrárias, mas considerarei os cenários mais comuns, isto é, aqueles que não se afastam demais de uma visão convencional. Aqui e ali, apontarei alguns cenários pouco convencionais esquecidos, mas que possuem uma estrutura formal consistente e forte embasamento nas teorias convencionais.

Aceitaremos a teoria da gravitação que Einstein propôs em 1915 e chamou (de modo pouco correto) de Teoria da Relatividade Geral, pois pensava que deveria ser a extensão natural da Relatividade Especial. Enquanto esta se limitava a referenciais associados a sistemas inerciais, e consequentemente admitia transformações lineares de coordenadas (o chamado grupo de Lorentz), a Relatividade Geral deveria se abrir para transformações arbitrárias de coordenadas. Ela foi identificada como uma teoria da gravitação que transformou os efeitos da força gravitacional newtoniana em alterações da métrica do espaço-tempo.

Para aplicar essa Relatividade Geral ao Universo, foi necessário usar um sistema de coordenadas, que consiste na escolha de uma representação tradicional na qual se usa a separação newtoniana $3 + 1$, correspondente a três dimensões de espaço e um único tempo cósmico, global. Vamos nos deter um pouco no significado dessa escolha. Queremos responder à questão: como é possível organizar uma representação do Universo em termos de um tempo comum, global, em que os diversos sistemas de coordenadas devem ser tratados igualmente?

Começamos por reconhecer a existência de uma miríade de tempos próprios, um para cada corpo ou observador. Nos primeiros anos do século XX, Poincaré, Lorentz, Minkowski e Einstein organizaram a descrição dos observadores inerciais e construíram esses múltiplos tempos.

Como ponto de partida, devemos reconhecer o princípio segundo o qual, ao descrever um fenômeno, é legítimo usar qualquer sistema de referência, esteja ele associado a um observador inercial ou acelerado. Para fixar a posição quadridimensional de um acontecimento no espaço-tempo também é possível eleger qualquer sistema de coordenadas. Segundo a Teoria da Relatividade, somente quantidades invariantes por transformações de representação são relevantes em um discurso científico sobre os fenômenos. Isso garantiria que estamos tratando de sinônimos. Eles devem conter a mesma informação dos processos no mundo, como se fossem discursos iguais em dialetos distintos. Quando seleciono uma dada representação, dou informação sobre essa escolha, mas isso não é relevante para caracterizar o fenômeno. Só caracteriza a minha particular forma de descrição.

Se é assim, então devemos recorrer ao matemático e perguntar: que representações são mais adaptadas a um discurso que fazemos sobre o mundo ao caracterizar e descrever um fenômeno? “Isso depende do fenômeno”, ele responderá. Podemos insistir e especificar melhor a nossa questão: na descrição de um fenômeno, qualquer que seja, é possível conservar uma descrição newtoniana do Universo, separando as três dimensões do espaço, de um lado, e uma dimensão temporal, de outro?

A resposta foi dada por Gauss: sim, é possível. Ele mostrou um modo prático de como isso pode ser feito. Usando uma linguagem moderna, o procedimento para essa escolha de representação (que chamaremos, por simplicidade, de representação gaussiana) segue os seguintes passos.

Dada uma configuração qualquer do espaço-tempo (qualquer que seja sua métrica), escolhe-se uma classe de observadores inerciais, livres de qualquer força, interagindo somente por gravitação, que chamaremos de congruência de curvas geodésicas. Chama-se geodésica a curva descrita por um corpo livre de qualquer força. Do ponto de vista matemático, é o caminho mínimo entre dois pontos arbitrários do espaço-tempo.

Admitimos que esses observadores compartilham um tempo comum. A questão relevante é saber se essa congruência inercial, construída a partir de uma dada região do espaço-tempo, pode ser estendida de modo a preencher toda essa variedade quadridimensional. A resposta não depende somente da geometria, mas envolve condições globais que são tratadas na topologia. Dito de modo simples, Gauss mostrou que nem sempre é possível construir uma representação de tempo único capaz de ser estendida para todo o espaço-tempo, embora sempre seja possível fazê-lo em uma região compacta de qualquer geometria.

Em alguns casos, como na quase totalidade dos modelos cosmológicos que são soluções das equações de Einstein para a gravitação (Einstein, Friedmann, De Sitter, Kasner), tal escolha de um tempo global único para todos os observadores é possível. Porém, isso não é possível no caso da geometria descoberta pelo matemático Kurt Gödel.

A física relativista mostrou que cada corpo material pos-sui um tempo próprio. Essa multiplicidade temporal eliminou completamente o tempo absoluto newtoniano. No entanto, a cosmologia usa em sua descrição do Universo um tempo único. Como se pode entender essa situação?

Vimos que a descrição dos fenômenos requer uma escolha particular de um sistema de coordenadas, isto é, do modo pelo qual se pode caracterizar um ponto, ou um acontecimento, no espaço-tempo. O princípio relativista impõe que um sistema de coordenadas pode ser mais conveniente, mas não melhor que os demais. Assim, para descrever essa enorme quantidade de galáxias (mais de 100 bilhões em nosso horizonte observável), cada uma delas contendo da ordem de 100 bilhões de estrelas, optou-se por usar um sistema gaussiano de representação, separando-se três dimensões de espaço e uma dimensão de tempo.

Dessa forma, introduz-se um tempo cósmico que, embora não seja absoluto, é semelhante à descrição tradicional newtoniana.

Reconhecemos nessa construção – com a escolha particular de uma representação que contém um tempo único global – a principal hipótese que organiza a cosmologia moderna. Os matemáticos chamam a esse tempo de gaussiano, enquanto os físicos o chamam de tempo cósmico ou global. Possivelmente, os filósofos o chamariam de duração bergsoniana.

A matéria no Universo

Além da matéria ponderável, massiva, sob forma de estrelas e seus conjuntos galácticos, grande parte da energia no Universo está concentrada em radiação (fótons) e em neutrinos livres. As estrelas são constituídas por bárions, ou seja, basicamente prótons e nêutrons.

Vista como um todo, a distribuição da matéria e da energia no Universo é representada por um fluido perfeito, contínuo, cuja completa caracterização requer somente duas quantidades: a densidade de energia (E) e a pressão (P). Essa escolha simples foi indispensável para poder encontrar uma solução para as complexas equações da Teoria da Relatividade Geral. A partir desse fluido de matéria, um tempo gaussiano é atribuído ao Universo.

Como vimos, entre a pressão P e a densidade de energia E existe uma relação $P = w E$. No caso de a energia ser dada pelos fótons, a relação é $P = 1/3 E$.

A matéria ponderável, na qual não existe interação de suas partes, é caracterizada pela ausência da pressão ($P = 0$).

Essas quantidades (matéria bariônica e fótons) são conservadas separadamente. Isso implica (pelas correspondentes leis de conservação em um Universo em expansão) que quando o volume do Universo é muito pequeno, a energia dos fótons controla a sua evolução. A matéria ponderável será importante em uma fase ulterior, em que o volume do Universo já é considerável.

As forças de interação

Além de matéria e energia, encontramos no Universo quatro forças de interação: eletromagnética, gravitacional e nucleares (forte e fraca). As duas primeiras, conhecidas de longa data, estão presentes em nossa experiência cotidiana. As forças nucleares, que ocorrem no microcosmo, são de dois tipos. A nuclear forte é responsável pela estabilidade da matéria, enquanto a nuclear fraca é responsável pela desintegração da matéria.

Embora seja a mais fraca de todas as forças, a gravitação domina a estrutura e a evolução do Universo.

Nas dimensões enormes do cosmos, as forças nucleares não desempenham papel importante, a não ser na organização da matéria.

As forças eletromagnéticas têm sinal, isto é, podem ser atrativas ou repulsivas. Isso implica que em um Universo constituído de átomos, matéria neutra, elas se cancelam.

Então, dominante nas enormes dimensões do Universo, sobra a interação gravitacional, que é universal: tudo o que existe sente a força gravitacional. Não existe nada, nenhuma forma de matéria e/ou energia que não seja

atraída pela gravitação. Graças a essa universalidade, poderíamos mesmo afirmar, de modo ingênuo, “caio, logo existo”. Consequentemente, qualquer teoria da gravitação determina uma cosmologia que lhe é associada.

A gravitação: de Newton a Einstein

Em 1915, o físico alemão Albert Einstein modificou a teoria da gravitação de Newton. Ele não mostrou que Newton estava errado, mas sim que sua teoria da gravitação devia ser alterada quando o campo de força é muito grande. Na Terra e em suas vizinhanças, ainda poderíamos usar a forma newtoniana para descrever processos gravitacionais, mas quando os campos são bem mais intensos – como acontece na vizinhança de estrelas muito compactas, como um buraco negro, ou no Universo profundo descrito pela cosmologia – deve ser usada a nova teoria de Einstein, chamada Teoria da Relatividade Geral.

O Universo segundo Einstein

As características do Universo em sua totalidade são determinadas pela força gravitacional. Assim, ao alterar a gravitação de Newton, Einstein procurou as propriedades do nosso Universo dentro da nova Teoria da Relatividade Geral. Como não havia nenhuma observação global do Universo para guiá-lo nessa tarefa, ele criou um modelo de Universo estático, que parecia melhor se adaptar à sua visão do mundo. Duas décadas depois dessa proposta, mostrou-se que ela não se adequava às características observadas.

Constante cosmológica: uma estrutura clássica ou quântica?

As equações da Teoria da Relatividade Geral podem ser interpretadas igualando propriedades da geometria – a curvatura do espaço-tempo – à distribuição de matéria e energia.

Além da matéria e das energias conhecidas (matéria ponderada, constituindo galáxias e radiação), o primeiro modelo cosmológico de Einstein faz apelo à existência de uma forma inusitada de energia que ele apelidou de constante cosmológica e representou pela letra grega Λ (lambda).

Em um primeiro momento, a constante cosmológica foi associada à geometria e colocada do lado esquerdo da equação da Relatividade Geral. Contrariamente a toda observação, ela parecia indicar uma forma misteriosa de repulsão gravitacional. Não era uma repulsão do tipo que aparece, por exemplo, na interação eletromagnética. Nesta, duas partículas de mesma carga, como dois elétrons, se repelem. O equivalente gravitacional dessa repulsão eletromagnética seria supor a existência de massa negativa, o que a observação descarta. Essa Λ não seria então associada a uma característica da matéria, mas sim a algo misteriosamente escondido no cosmos.

Mais tarde, essa constante foi associada a um fluido etéreo que existiria preenchendo o Universo, um resquício da ideia transfigurada do éter que pairava na física do século XVIII. Com efeito, do ponto de vista formal, Λ pode ser interpretado sob a forma de um fluido perfeito. Para isso, deve-se impor uma especial relação entre a pressão e a densidade de energia, na qual o fator w , já referido, teria valor negativo (-1). Não se conhece nenhuma forma de matéria, observada em laboratório, que tenha essa propriedade. Ou seja, Λ seria algo único, não diretamente observável. Ademais, esse misterioso fluido agiria sobre tudo o que existe, mas não seria objeto da ação de nenhuma forma de matéria e energia, uma característica inusitada e que não tem similar em nenhuma outra forma de matéria e energia. Tratava-se de um mistério profundo.

Com o advento da teoria quântica, uma nova interpretação para Λ apareceu com a entrada em cena do estado fundamental, o vácuo quântico.

Os físicos usaram a imaginação para construir modelos realistas para esse fluido, identificado como Λ , a partir de estados fundamentais de campos (escalar e eletromagnético), satisfazendo teorias não lineares. Os detalhes técnicos estão nas referências.

A constante cosmológica Λ nas teorias não lineares da matéria

Embora seja uma incursão técnica, não posso deixar de comentar que, em geral, teorias não lineares possuem certos estados representados precisamente por uma forma de distribuição de energia que é idêntica à da constante cosmológica.

Ou seja, existem configurações de certos campos clássicos nos quais Λ aparece naturalmente. Um exemplo notável é o campo eletromagnético. Em sua versão linear, tradicionalmente gerada pelas equações propostas por Maxwell, a configuração com Λ não aparece. Entretanto, ao passarmos a processos não lineares, como os descritos por exemplo na teoria original de Born-Infeld para o eletromagnetismo clássico, a configuração de uma constante cosmológica é um estado possível.

Esse estado de teorias não lineares do eletromagnetismo tem gerado modelos cosmológicos não singulares com *bouncing*. Essa não linearidade serve como processo regulador em alguns cenários, impedindo que o Universo desapareça em uma singularidade.

O Universo segundo Friedmann

Poucos anos depois do aparecimento do modelo cosmológico de Einstein, o cientista russo Alexander Friedmann elaborou outro modelo cosmológico, descrevendo um Universo em evolução, embora àquela época não houvesse nenhuma observação que pudesse corroborar a ideia de que a geometria do Universo varia com o tempo cósmico. Segundo Friedmann, o volume total do espaço tridimensional varia com o tempo. Essa ideia provocou uma forte crítica de Einstein, mas depois ele foi obrigado a aceitar que Friedmann tinha razão. Ou seja, o Universo não é estático, como Einstein pensara, mas sim possui uma dinâmica, como Friedmann propôs.

Isso criava uma questão crucial. Se o volume do espaço aumenta com o passar do tempo – como os astrônomos Georges Lemaître e Edwin Hubble demonstraram –, então ele foi menor no passado. Quão pequeno foi o Universo? Entre as décadas de 1960 e 2000, aceitou-se a ideia de que o Universo teria começado a se expandir há uns poucos bilhões de anos a partir de um ponto singular. Isso criou uma dificuldade dramática na cosmologia.

Malgrado um certo desagrado ideológico com essa suposta dinâmica cósmica, Einstein foi levado a aceitar (como *referee*) que o artigo de Friedmann exibindo essa configuração não estática fosse publicado em uma revista científica alemã (veja no apêndice reprodução da primeira página do artigo de Friedmann).

Aqui, é necessário fazer um breve comentário sobre uma questão crucial: a existência de singularidade no modelo de Friedmann.

O que podemos dizer sobre o passado do Universo?

No cenário Big Bang, não temos muito a comentar. O Universo teria um início singular que não faz parte de uma descrição racional.

Mas, por que, sendo a gravitação uma força somente atrativa, o Universo se expande em um processo repulsivo?

Friedmann não sugere nenhuma solução, a não ser a suposição implícita de que isso se deve a uma condição inicial escondida. No entanto, considerar este processo como uma condição inicial equivale a negar que possamos conhecer a resposta. Outras propostas mais objetivas foram examinadas, nas quais processos físicos envolvendo diferentes formas de interação dão origem a fenômenos que podem ser interpretados como gerados por gravitação repulsiva (ver lista de referências).

Do Big Bang ao Universo eterno

A ideia de que o Universo começou a existir há uns poucos bilhões de anos, através de uma grande explosão – chamada, por onomatopeia, de Big Bang – passou a ser divulgada pelos meios de comunicação no final do século XX.

No entanto, o Big Bang significa tão somente que o Universo passou por um momento de extrema condensação. Ele não deve ser identificado com o começo de tudo. A razão é técnica, mas pode ser exposta, simplificada, do seguinte modo: toda medida, obtida através de uma experiência de qualquer fenômeno, deve ter como resultado um (ou mais de um) número mensurável, logo finito. Ora, no modelo de Friedmann, quantidades físicas – como a densidade de energia, por exemplo – assumiriam no Big Bang um valor impossível, infinito, que não pode estar presente em nenhuma observação, pois não resulta de nenhuma medida.

Em verdade, questões envolvendo a possibilidade de um valor infinito já haviam aparecido em várias outras partes da física, como na teoria eletromagnética. Para evitar essa dificuldade, a teoria que descreve os processos de interação de cargas elétricas teve que ser modificada, pois, segundo os físicos, a natureza tem horror a extremos: o vazio e o infinito.

No final da década de 1970, trabalhando independentemente, cientistas da antiga União Soviética e do Brasil propuseram modelos de Universo com um tempo de existência bem maior. Aquela extrema condensação – o Big Bang – seria somente um momento de passagem de uma fase de colapso do Universo – na qual seu volume total diminui com o tempo – para a atual fase de expansão, na qual este volume aumenta.

Ou seja, o Universo teria tido uma fase em que seu volume diminuiu com o tempo, teria passado por um valor mínimo diferente de zero e iniciado a seguir uma fase de expansão.

Isso cria de imediato novas questões: o que teria colapsado? E por que teria parado de colapsar, transformando o colapso em expansão? Os cosmólogos começaram a resolver essas duas questões nos últimos tempos.

Das origens da cosmologia relativista, ou do fracassado modelo cosmológico de Einstein, à eternidade do Universo

O ano de 1917 trouxe duas grandes novidades que ficaram à margem das terríveis dificuldades trazidas pela primeira grande guerra do século XX. Uma delas, de natureza política, foi a Revolução Socialista na Rússia, transformada em União das Repúblicas Socialistas Soviéticas. A segunda foi a produção do primeiro modelo científico em cosmologia. Embora hoje ambas tenham cedido lugar a outras modificações, podemos considerá-las como dois fatos marcantes que o século XX nos legou. Não farei comentários sobre a Revolução Russa, concentrando-me na ciência. A acreditar em Giordano Bruno, essa dissociação do político, com a descrição dos fenômenos físicos observados na natureza, é um erro de princípio que nenhum verdadeiro cientista deveria cometer. No entanto, sem negar esse pecado formal, pensarei nessa associação em outro lugar.

Dois anos depois de produzir uma alteração profunda na interpretação newtoniana dos fenômenos gravitacionais, estabelecendo o que chamou Teoria da Relatividade Geral, Einstein examinou as consequências da nova teoria sobre a visão dos cientistas sobre o Universo. Para entendermos a dificuldade dessa tentativa, bem como sua grandiosidade formal, é importante ressaltar que naquele momento a comunidade científica não demonstrava nenhum interesse nessa questão. Inexistia qualquer observação de caráter global. Vários importantes momentos da história da cosmologia foram forjados naquele século, mas creio que podemos aceitar que, somente a partir da década de 1960, a cosmologia passou a ter um lugar de destaque nas atividades científicas.

Em sua proposta de descrição global do Universo, Einstein parece ter sido guiado somente por sua intuição formal e suas idiossincrasias filosóficas, entre as quais a mais crítica foi aceitar a visão pré-relativista, newtoniana, de que o Universo deveria ter uma configuração estática. A proposta de cenário cósmico que Einstein propôs baseava-se em três hipóteses que se revelaram incorretas, a saber:

1. A topologia do Universo é fechada. A seção espacial é finita, mas ilimitada. Ou seja, a tricurvatura é constante e igual a 1.
2. A geometria que descreve o Universo é estática.
3. A principal fonte da energia controladora da geometria do Universo é constituída por matéria incoerente, sem interação de suas partes; além dela, existe uma energia misteriosa de estrutura desconhecida, imaterial, chamada constante cosmológica.

Esse primeiro modelo cosmológico proposto por Einstein não tem suporte observacional. Com efeito, o modelo padrão da cosmologia atual afirma que:

1. A seção espacial do Universo é euclidiana, ou seja, a curvatura do triespço é nula.
2. O Universo é um processo dinâmico: a curvatura da sua geometria varia com o tempo cósmico.
3. Ao longo da história do Universo, as fontes da geometria concentraram-se ou sob forma de radiação (a densidade de energia dos fótons dominou o cenário cosmológico nos momentos iniciais da atual fase de expansão) ou como matéria ponderada (galáxias e aglomerado de galáxias). Nos últimos anos, a constante cosmológica, entendida agora como *energia escura*, ressurgiu como um possível fator capaz de produzir uma explicação alternativa para a aceleração do Universo.

Havia outro problema no modelo cosmológico de Einstein: ele é muito instável. Ou seja, um Universo controlado por aquela geometria não teria existido por tempo suficiente para gerar configurações estáveis e permitir o aparecimento da vida, dos planetas, da Terra e da espécie humana.

Duas características da proposta de Einstein permaneceram. A primeira diz respeito à separação do espaço-tempo quadridimensional em três dimensões de espaço e uma de tempo. Longe de esta proposta configurar um retorno a ideias pré-relativistas, tal escolha de sistema de coordenadas simplificou muito as equações que descrevem a evolução da geometria que representa o Universo.

A segunda, mais importante, tornou-se uma questão crucial da cosmologia. Foi inserida sub-repticiamente em seu programa e depende da existência da constante cosmológica contida em sua terceira hipótese. Trata-se da proposta revolucionária de que a cosmologia não se esgota na física.

Anos depois, no final da década de 1930, Lemaître, Hubble e outros mostraram que as observações astronômicas podiam ser interpretadas à luz da Teoria da Relatividade Geral, desde que abandonássemos a hipótese de que o Universo possui uma geometria estática. Essas observações eliminaram completamente o modelo cosmológico de Einstein.

A questão do horizonte no Universo de Friedmann

A existência de um limite máximo para a velocidade de propagação da informação (a luz) implica que cada corpo, cada observador, só tem acesso em cada instante a uma parte limitada do Universo. Assim, o observador B na figura abaixo só recebe informação do que aconteceu com o corpo A no tempo Σ_i no instante t_b . Cada corpo possui um seu horizonte delimitado pelo seu cone de luz.

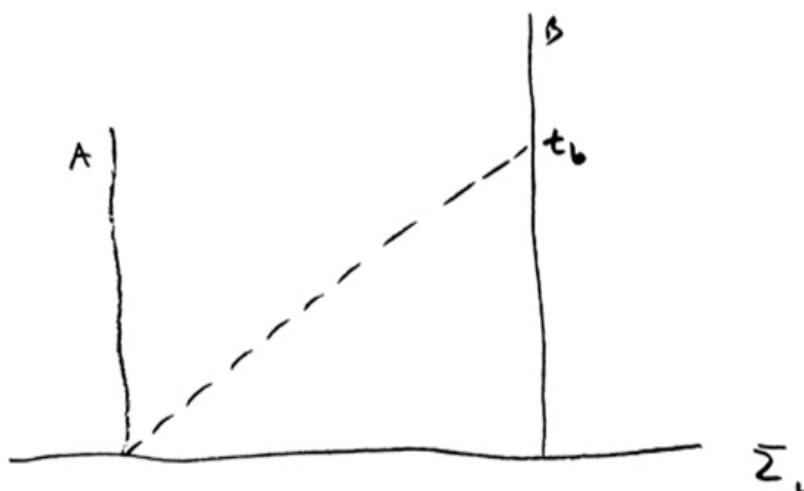


Figura 18

Consideremos agora um cenário em que em um caso particular de modelo cosmológico do tipo de Friedmann o Universo possui um começo (Big Bang) e um fim, com um tempo de duração finita. Veja, nas figuras 19 e 20, a representação de dois corpos, A e B, em um modelo de Universo que começa em Σ_i e termina em Σ_f .

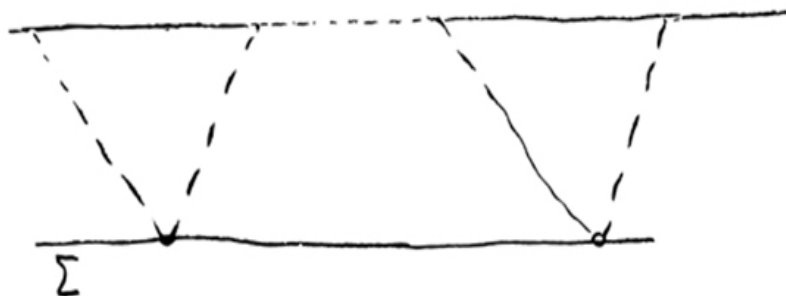


Figura 19

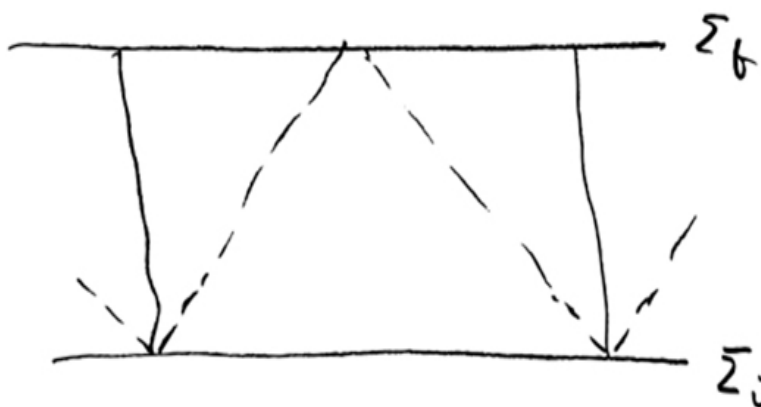


Figura 20

Dependendo da distância espacial entre A e B no instante inicial, pode ser que eles nunca troquem informações. Nesse caso, durante o tempo de duração desse hipotético Universo finito, eles não saberão que o outro existe.

O modelo de Friedmann foi construído com um *background* cósmico semelhante ao proposto por Einstein, mas com uma diferença fundamental: a geometria varia com o tempo, não é estática. Uma interpretação simples mostra que, com o passar dos tempos, o volume total do espaço aumenta a partir de um ponto singular onde toda a energia-matéria do mundo está concentrada. Essa singularidade é descrita matematicamente como a divergência das quantidades físicas. Ou seja, naquele ponto de valor infinito, a densidade de energia e a temperatura ambiente teriam assumido uma quantidade que não existe no mundo físico.

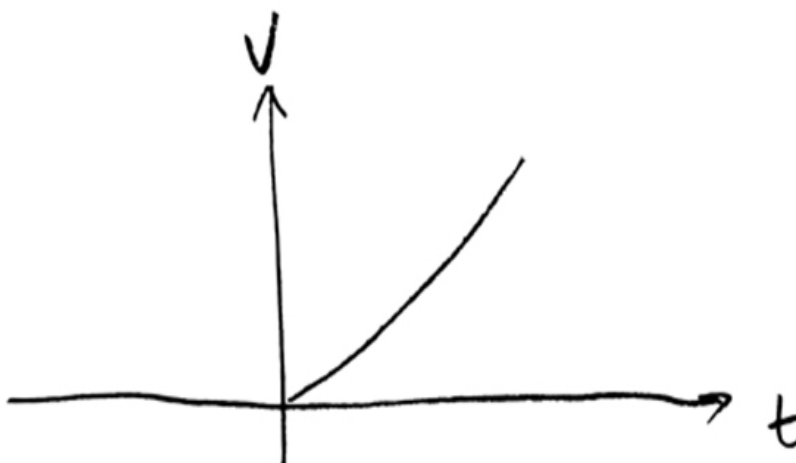


Figura 21

O cenário de Einstein não requeria uma análise de sua origem, pois seu modelo de Universo estático, independente do tempo, não tem uma origem. Mas os modelos cosmológicos a partir de Friedmann contêm a questão da origem do Universo.

Próxima à singularidade do modelo de Friedmann, a fonte de expansão são os fótons. A pressão produzida por esses fótons torna desnecessário introduzir uma constante cosmológica. Veremos, no entanto, que depois de várias décadas sem que Λ fosse considerada relevante, ela reapareceu no século XXI, por razões que vieram do mundo quântico.

No mesmo ano da proposta de Einstein (1917), o astrônomo holandês Willem De Sitter encontrou outra solução estática, gerada somente pela constante cosmológica. Mais tarde, na década de 1940, ela foi usada por Fred Hoyle para descrever seu modelo de Universo (“*steady state universe*”). Na década de 1980, o cenário de De Sitter serviu para descrever os primeiros modelos cosmológicos de inflação, elaborados para atenuar as dificuldades causais do cenário original de Friedmann.

Comentário adicional

Temos usado a palavra Universo para caracterizar a totalidade de matéria e energia concentrada em estrelas e seus aglomerados em galáxias, além de toda forma de energia de radiação. Mas existem soluções das equações da Relatividade Geral – o chamado Universo de Kasner é um exemplo – sem nenhuma forma de matéria e energia. Esse é uma das estranhas consequências da não linearidade das equações da teoria.

A crítica (incorreta) de Einstein

Na mesma revista (*Zeitschrift für Physik*) em que Friedmann havia publicado seu artigo, tendo Einstein como *referee*, este último fez publicar o seguinte comentário, no qual argumentou que os cálculos de Friedmann não eram corretos:

REMARK ON THE WORK OF A. FRIEDMANN (FRIEDMANN 1922)
"ON THE CURVATURE OF SPACE"

A. Einstein
Berlin

Received September 18, 1922

The work cited contains a result concerning a non-stationary world which seems suspect to me. Indeed, those solutions do not appear compatible with the field equations (A). From the field equations it follows necessarily that the divergence of the matter tensor T_{ik} vanishes. This along with the anzatzes (C) and (D) leads to the condition

$$\partial\rho/\partial x_4 = 0$$

which together with (8) implies that the world-radius R is constant in time. The significance of the work therefore is to demonstrate this constancy.

REFERENCES

Friedmann, A. 1922, Zs. f. Phys., 10, 377.

Figura 22

Comentário sobre o trabalho de A. Friedmann (Friedmann 1922)
"Sobre a curvatura do espaço"

A. Einstein
Berlim

Recebido a 18 de setembro de 1922

O artigo citado contém um resultado sobre o caráter não estacionário do mundo que me parece suspeito. Com efeito, essas soluções não parecem compatíveis com as equações de campo (A). Das equações de campo decorre necessariamente que a divergência do tensor de matéria T_{ik} se anula.

$$\partial\rho/\partial x_4 = 0.$$

Essa condição, junto com a proposta (C) e (D) levam à condição de que a derivada temporal da densidade de energia é zero, o que, junto com a equação (8), implica que o raio do Universo R é constante no tempo. Assim, o significado desse trabalho é demonstrar essa constância.

Qualquer estudante atual de física é capaz de reconhecer, de imediato, o erro contido na argumentação de Einstein. Estranho que ele tenha sido tão descuidado a ponto de fazer uma crítica inconsequente a um trabalho em que Friedmann mostrou que o cenário estático que ele mesmo propusera para representar o Universo não era o único compatível com as equações da Relatividade Geral.

O início da ideia do Big Bang

Em conferências na Bélgica, em 1931, o cômego Georges Lemaître tratou a singularidade presente no cenário matemático de Friedmann como um fenômeno físico convencional, ao qual se pode atribuir uma imagem a partir de uma analogia com a desintegração da matéria, que havia sido descoberta no começo do século XX. Em seu livro *The Primeval Atom: An Essay on Cosmogony*, escreveu: “A hipótese do átomo primordial é uma hipótese cosmogônica que descreve o Universo atual como resultado da desintegração radioativa de um átomo.”

Lemaître apresenta com essas palavras o cenário singular da geometria do Universo que daria origem ao modelo chamado Big Bang. Falaremos sobre essa conjectura adiante. Aqui, farei um comentário como introdução a uma das questões mais cruciais da cosmologia moderna: o Universo existe há um tempo finito ou infinito?

Teoremas da singularidade

Para tentar esclarecer e resolver definitivamente esta questão, alguns matemáticos, como Roger Penrose (1942-) e Robert Geroch (1942-), e físicos, como George Ellis (1939-) e Steven Hawking (1942- 2018), a formularam em termos precisos e rigorosos, cujo resultado foi divulgado sob a forma de alguns teoremas.

Isso foi benéfico, pois aprofundou o conceito de singularidade, até então usado de modo vago. Mas também trouxe um movimento retrógrado, pois inibiu a análise de cenários cosmológicos alternativos, mais realistas, sem singularidade. Isso se deveu à forma como os teoremas foram expostos, como se a singularidade fosse inevitável quando se usam a Teoria da Relatividade Geral e algumas características da matéria que à primeira vista parecem aceitáveis.

Até o advento desses teoremas, ao final da década de 1960, as consequências da Relatividade Geral eram tratadas a partir de propriedades geométricas, enfatizando-se o caráter local da métrica do espaço-tempo. Esses teoremas levaram os relativistas a considerar propriedades topológicas – isto é, globais – do espaço-tempo.

A partir da afirmação dos teoremas, a ideia de que era necessário aceitar a origem singular do Universo pareceu ser mais do que uma propriedade particular dos modelos do tipo Friedmann. Tornou-se uma característica interna da própria teoria.

Para não entrar em questões técnicas, basta notar que, nesses teoremas, a característica mais relevante da interação foi relegada a um plano secundário. Refiro-me ao modo como a matéria interage com o campo gravitacional. Evitar a singularidade poderia ser feito com fluidos esdrúxulos (como a constante cosmológica ou outros tipos com pressão negativa) ou por acoplamentos não mínimos de campos clássicos com a métrica. (Ver detalhes nas referências e, em particular, o livro *Do Big Bang ao Universo eterno*, em que tratei amplamente dessa questão.)

A história da singularidade começou a mudar no final da década seguinte. A situação naquela época foi resumida pelas conclusões apresentadas pelo famoso físico inglês Dennis Sciama (1926-1999) em Conferência na International Atomic Energy Agency (Viena), em 1969, a respeito de dois de seus antigos alunos:

A solução apresentada por Friedmann possui uma singularidade que impede a continuidade da análise de suas propriedades antes dela. Até então se pensava que essa singularidade era consequência das hipóteses de alta simetria desse modelo (espacialmente homogêneo e isotrópico). A questão só foi definida no final da década de 1960, graças aos teoremas (Hawking e Penrose). [...]

O teorema mais poderoso, formulado por Hawking, Ellis e Penrose, afirma que as equações de Einstein, junto com as condições de energia e de causalidade e uma outra condição adicional, garantem a presença de uma singularidade. Essa última condição requer que haja um ponto cujo cone de luz do passado comece a convergir a alguma distância do ponto.

Ele termina com o seguinte comentário:

Argumentos desse tipo, entretanto, não nos dizem muito sobre a natureza da singularidade nem sobre como evitá-la, se isso é considerado desejável. São problemas difíceis, cuja solução está no futuro.

Na época, Sciama não poderia imaginar que a solução do problema exibido nos teoremas pelos seus dois antigos alunos seria dada por outro antigo aluno dele, dez anos depois.

Reprodução de um dos teoremas de singularidade:

Structure of Space-Time

Theorem I. The following requirements on a space-time³¹ $\mathcal{M}$ are mutually inconsistent:

- (Ia) There exists a noncompact spacelike hypersurface $\mathcal{C}$ for which

$$D_+(\mathcal{C}) = I_+(\mathcal{C})$$
- (Ib) There exists a trapped surface $\mathcal{T} \subset I_+(\mathcal{C})$
- (Ic) $R_{ab}l^a l^b \leq 0$ for each null vector l^a
- (Id) $\mathcal{M}$ is future-null complete

In (Id), “future-null complete” means that every null geodesic in $\mathcal{M}$ can be extended into the future to arbitrarily large values of a (given) affine parameter. We may think of this physically as the statement that “photons (or neutrinos or gravitons) cannot just disappear.”

Figura 23

Teorema I. As seguintes condições sobre um espaço-tempo M são mutuamente inconsistentes:

(Ia) Existe uma hipersuperfície do tipo espaço C para a qual
 $D_+(C) = I_+[C]$

(Ib) Existe uma superfície aprisionada $T \subset I_+[C]$

(Ic) $R_{ab}l^a l^b \leq 0$ para todo vetor nulo l^a

(Id) M é um espaço-tempo onde o futuro-nulo é completo, o que significa que toda geodésica em M pode ser estendida para o futuro para valores arbitrários de um dado parâmetro afim. Podemos pensar essa condição como a afirmação de que fótons (ou neutrinos ou grávitons) não podem simplesmente desaparecer.

Os primeiros cenários com *bouncing*

No cenário de Friedmann, o Universo tem uma origem singular. Pode-se perguntar: por que, sendo a gravitação uma força somente atrativa, o Universo se expande como um processo repulsivo?

Friedmann não sugere nenhuma solução, a não ser a suposição implícita de que isso se deve a uma condição inicial escondida, o que equivale a afirmar que não sabemos a resposta. Nada semelhante ocorre com cenários não singulares.

No cenário com *bouncing*, o Universo passou por uma fase anterior à atual, na qual o volume total do espaço tridimensional diminuiu com o tempo cósmico, passou por um valor mínimo diferente de zero e iniciou a seguir a atual fase de expansão.

Isso resolve um problema e cria outros dois: o que deu origem ao colapso e por que ele foi interrompido e transformado em expansão?

Em 1979, por caminhos e métodos independentes, usando distribuições de energia responsáveis pela evolução do Universo associadas a configurações distintas, dois físicos russos, V. Meklnikov e S. Orlov, e dois brasileiros, M. Novello e J. M. Salim, mostraram como é possível conciliar a Teoria da Relatividade Geral com um Universo não singular. O primeiro estudo usou um campo escalar; o segundo, o campo eletromagnético. Em ambos, a aplicação dos resultados dos teoremas era claramente impossível: tanto um quanto o outro construíram a interação com a gravitação através do processo não mínimo, no qual a métrica estava presente e aparecia a curvatura como um fator de interação, o que impedia submeter esses processos às premissas dos teoremas. Consequentemente, os teoremas não eram aplicáveis, o que mostrava a limitação de sua abrangência.

Uma curiosidade histórica: embora o artigo dos russos tenha sido publicado alguns meses antes do artigo dos brasileiros (março e julho de 1979, respectivamente), estes enviaram seu artigo para publicação alguns meses antes; os brasileiros em março de 1978, os russos em dezembro de 1978.

Esses dois primeiros modelos cosmológicos sem singularidade e vários outros com *bouncing* foram exhaustivamente descritos por Novello e Bergliaffa na revista *Physics Reports* em 2008.



Figura 24

Cenários com *bouncing* eram uma real possibilidade para evitar a singularidade dos modelos tradicionais, como os propostos em 1979. Mesmo assim, eles permaneceram quase vinte anos sem ser considerados pela comunidade internacional.

Um comentário adicional sobre este cenário. Na figura acima, vemos que esse modelo é simétrico no processo de inversão temporal. Ele começa no infinito passado, a partir do vazio completo (de matéria-energia e de curvatura do espaço-tempo nulas), e termina no infinito futuro em um vazio completo (de matéria-energia e de

curvatura do espaço-tempo nulas). Isso sugere a ideia de ciclos eternos. Finalmente, devemos notar que no cenário com *bouncing* a questão primeira é: *o que teria colapsado?* A resposta é dada pela instabilidade da estrutura mais simples, na qual não há matéria nem curvatura do espaço-tempo. Ou seja, um puro espaço-tempo vazio, identificado com a geometria de Minkowski da Relatividade Especial.

Os detalhes técnicos do Universo com *bouncing* gerado por um campo magnético aparecem nos apêndices B e C.

Das leis físicas às leis cósmicas

A generalização feita por Newton, ao reconhecer na queda de um corpo (geralmente descrito como uma maçã) um procedimento universal, e seu sucesso ulterior permitiram a aceitação generalizada de que o que acontece na Terra acontece em todo lugar. As relações entre corpos e acontecimentos (o que chamamos, em alguns casos, de “lei da natureza”) seriam as mesmas em qualquer lugar e em qualquer tempo.

Ao longo do século XX, apareceram processos inesperados que limitaram esta generalização.

Começemos por considerar a proposta de que as leis físicas terrestres valem para todo o Universo, ou seja, de que os fenômenos observados na Terra são os mesmos em todo o Universo.

Essa hipótese tornou-se uma verdade absoluta e passou a gerenciar uma visão coerente e totalizante do mundo, mas não é difícil mostrar sua incoerência, seja formal, seja factual.

Antes de penetrar na descrição desses cenários científicos, precisamos fazer um comentário genérico sobre a estrutura das leis físicas.

Os cientistas viram-se desde sempre às voltas com as propriedades do que se chamou *lei física*. Ela controla os fenômenos da natureza. Embora sua forma possa variar, dependendo do grau de conhecimento obtido, constitui uma estrutura rígida, inabalável, que determina as configurações possíveis no mundo.

O objetivo final da ciência é atingir o cerne da lei e obter sua descrição completa. Um objetivo que, de tempos em tempos, os cientistas acreditam ter conseguido, para adiante se dar conta de que novos fenômenos, até então desconhecidos, impõem alterações na lei. Essa variação da lei é convencional e está associada à natureza humana. Não diz respeito às leis do mundo propriamente dito.

Pois bem, ao longo do século XX, acumularam-se evidências de um tipo de variação mais dramático, ao se reconhecer que essas leis não são as mesmas em todo o cosmos, podendo variar conforme a localização espacial e/ou temporal. Em um primeiro momento, essa variabilidade das leis apareceu como uma fantasia, uma especulação de cientistas renomados – como Dirac, Lattes, Hoyle e outros – que podiam se permitir interpretações pouco comuns de alguns fenômenos, induzindo à possibilidade de tratar leis físicas como variáveis.

Tais especulações nunca foram de agrado do *establishment*, mas não eram tratadas com repulsa. Aos poucos, no entanto, diversas propriedades mereceram análise tão distinta das convencionais que essas propriedades de variação das leis físicas passaram a ser convencionais, tornando-se uma importante área de investigação.

A física não pode penetrar no que chamei “reservatório de virtualidades”, em que as leis físicas se fazem e se desfazem. Mas a cosmologia pretende ir além, na trilha da metacosmologia.

Quando, para entender a estrutura do Universo, admite-se a variabilidade das leis físicas, como fez Sakharov, liberta-se o Universo de uma obediência formal, imposta por cientistas entusiasmados com o sucesso de seu saber. Esse momento pode ser interpretado como o fim da submissão do cosmos a uma ordem rígida e o retorno da liberdade formal da natureza, que havia sido retirada por arrogância.

Vamos comentar dois exemplos – um observacional, outro teórico –, ambos associados ao campo gravitacional.

O exemplo mais marcante de que propriedades da física local, na Terra e em suas vizinhanças, podem não ser válidas globalmente, nos confins do Universo, foi apresentado em 1949 pelo matemático austríaco Kurt Gödel. Em uma conferência em homenagem ao seu amigo A. Einstein, Gödel apresentou um modelo de Universo no qual o princípio causal é válido em cada ponto desse Universo, mas não vale globalmente.

Já vimos que a existência de um limite máximo de propagação de informação, identificado com a velocidade da luz, permite construir configurações tipo cones, em uma representação espaçotemporal, de modo que a luz se propaga sobre esses cones e qualquer forma de matéria e energia só pode se propagar no interior desses cones. Para cada observador no mundo, existe associado um cone no espaço-tempo que determina como ele distinguirá passado e futuro. Assim, a causalidade local é rigorosamente definida.

Mas a força gravitacional que atua sobre os fótons, grãos elementares da luz, distorce a orientação desses cones. O resultado mais dramático, descoberto por Gödel, refere-se à possibilidade de essa deformação impedir a veracidade global da sentença “ao caminhar para o futuro, afasto-me de meu passado”. Essa sentença, que em nosso cotidiano não permite dúvida, deixa de ser globalmente certa. Gödel mostrou que em certas configurações do campo gravitacional – que não são as de nossa vizinhança terrestre –, ao caminhar para o futuro, eu me

aproximo do meu passado. A imagem do tempo como uma linha reta deveria ser transformada na imagem de um círculo. (Ver figuras na seção sobre a questão causal.)

Assim, Gödel mostrou que a ideia utópica de volta ao passado não conflita com a lei física que descreve os processos gravitacionais. Ao mesmo tempo, ele conseguiu demonstrar pela primeira, de maneira clara e simples, a razão pela qual não é possível termos aqui a experiência de volta ao passado: o campo gravitacional produzido pela Terra, com características diferentes da configuração descoberta por Gödel, é fraco. (Ver a figura representando essa situação no capítulo anterior sobre causalidade global na Relatividade Geral.)

Encontramos outro exemplo notável da dependência das leis físicas ao tempo cósmico ao tentar responder à questão: por que existe matéria e não antimatéria no Universo?

A origem dessa questão está intimamente relacionada à descoberta, em laboratório terrestre, de que os processos envolvendo matéria bariônica (como o próton e o nêutron, constituintes fundamentais de todos os átomos) são perfeitamente simétricos na troca de matéria por antimatéria. Isso significa que um processo que envolve uma partícula tem a mesma probabilidade de ocorrer com sua antipartícula. Ou seja, se essa lei física fosse válida em toda a história do Universo, deveríamos ter uma quantidade de matéria igual à de antimatéria, o que não se observa. Nosso Universo contém matéria e não antimatéria, pelo menos em quantidade apreciável.

O físico soviético A. Sakharov associou essa ausência de simetria em escala global à interação gravitacional. A questão que se colocou então foi: como essa interação poderia ter ocorrido e de forma tão radical? A solução natural foi associar esse processo aos momentos em que o campo gravitacional era extraordinariamente intenso, ou seja, na região extremamente concentrada do Universo, nos primórdios da atual fase de expansão espacial.

Esses exemplos mostram que, em certas situações especiais, as leis físicas terrestres modificam-se por causa da forte influência do campo gravitacional. Como a gravitação na Terra e em suas vizinhanças é fraca, esses fenômenos praticamente inexistem e escapam à observação.

Para observá-los, devemos olhar para as profundezas do cosmos, em regiões de altíssima curvatura da geometria do espaço-tempo.

A descoberta da possível variação das leis físicas levou a questões aparentemente inusitadas e introduziu, principalmente entre astrônomos ingleses, o que se chamou a questão teleológica: as propriedades específicas da matéria e a evolução do cosmos, a dependência das leis físicas em relação ao tempo, associam-se com um objetivo final? Por que a massa das partículas elementares tem precisamente o valor que medimos? Por que as constantes das interações – a carga do elétron, a massa do neutrino – têm este valor preciso e não outro? Estariam esses valores relacionados à estabilidade deste Universo, permitindo sua existência por um tempo suficientemente longo para o aparecimento da vida? A explicação da aparência do Universo estaria assim à nossa espera?

Que cenário do Universo podemos inferir dessa dependência cósmica das leis físicas?

Alguns físicos propuseram esse estranho encantamento do mundo, ao associar essa dependência a uma origem teleológica. Devemos deixar esse antropomorfismo exacerbado de lado e abandonar essa ideia de que a humanidade tem um papel fundamental na história do Universo. Essa variabilidade cósmica das leis físicas nada mais é do que a contrapartida da hipótese de existência de uma ordem absoluta, única, imutável, no Universo. Ou seja, decorre do uso irrestrito, sem fundamentação, da validade inalterada das leis físicas terrestre em todo o Universo.

Ao cosmólogo, resta a tarefa de criar uma nova ordem, uma lógica interna na produção dessa variação. Ou, dito de outro modo, procurar as leis cósmicas.

Um salto no vazio: a origem do cosmos

O mundo quântico trouxe à tona uma das propriedades mais inusitadas da física: o vazio. Contrariamente ao que se entende por esse termo no dialeto newtoniano, o vazio quântico é enormemente composto de estruturas opostas que se cancelam, como os pares de partículas com que começamos este nosso diálogo, elétrons e pósitrons.

Esse estado fundamental, o vazio, é desprovido da qualidade convencional que permite apontar para uma coisa e dizer “ela existe”. A multiplicidade desses vazios leva a afirmar que alguns deles admitem uma cosmologia associada, capaz de descrever uma fase do Universo.

Em verdade, a matéria que existe no cosmos, sua energia e a totalidade da estrutura geométrica do espaço-tempo parecem ter nascido desse estado imaterial, o vazio, que não se deixa caracterizar como matéria ou energia.

A dicotomia *o ser e o nada* dissolve-se no território da física moderna.

Hierarquia entre os vazios

O vazio pesa. Isto é, como toda forma de energia e matéria, o vazio também cria campo gravitacional. Mais inesperado ainda: alguns vazios são mais vazios do que outros. Como isso é possível?

Um Universo que se expande uniformemente no espaço homogêneo e no tempo; completamente homogêneo espacial e temporalmente; com origem em uma misteriosa constante cosmológica, identificada com a geometria cósmica que Einstein imaginou, para, logo em seguida, rejeitá-la (ela foi depois associada ao vazio especial do mundo quântico).

Lidando com as equações da Relatividade Geral, o físico americano E. Kasner encontrou uma solução mais inesperada do que essa proposta de Einstein. Ela foi interpretada como uma cosmologia sem nenhuma forma de matéria ou de energia.

Essa cosmologia de Kasner ultrapassa as estranhezas de outros vazios que representam um Universo homogêneo, espacialmente anisotrópico, possuindo expansão e contração distintas conforme as direções do espaço.

Qual sua origem? Qual sua fonte? O vazio completo de matéria e energia. Sem sequer a constante cosmológica. Isto é, o vazio clássico absoluto.

Uma tal cosmologia é possível, porque a propriedade da dinâmica gravitacional associa-se a equações não lineares como descritas na Teoria da Relatividade Geral.

Este é um exemplo de uma propriedade notável: processos não lineares não requerem uma fonte que lhe dê existência, pois podem resultar de um autoestímulo.

Ou seja, para existir, o Universo autocriado não necessita de uma fonte externa.

Assim, nos preparamos para um grande salto para além do vazio.

Criação a partir do nada

Podemos então sintetizar as diferentes propostas sobre os modos de criação do cosmos:

Ato I. Criação única. Big Bang como exemplo simplista.

Ato II. Universo eterno. Versão clássica e quântica.

Ato III. Universo cíclico e futuro imprevisível.

Vimos (atos I e II) como a ciência moderna produz modelos sobre a *physis* nos quais Universos são criados.

No livro *O que é cosmologia?*, comentei exaustivamente sobre a impossibilidade de não existir alguma coisa, pois o vazio é instável.

Utopias científicas (de Gödel a Markov)

*Na natureza, tudo o que não é
proibido de acontecer, acontece.*

A contradição geralmente evocada entre ciência e utopia, que encontramos em vários textos, não deveria ser considerada uma verdade isenta de críticas. Ela consolidou-se em certos discursos a partir de exemplos cotidianos transformados, por inércia, em regra geral. Afirma-se que é utópico desejar a juventude eterna, assim como esperar que a primavera não termine. São desejos irrealizáveis, identificados como utópicos por violarem alguma lei da natureza.

É possível reconhecer utopias mais brandas, aquelas que, embora não violem as leis da natureza, afastam-se da convenção dominante na sociedade, segundo a qual se deve aceitar uma definição única e universal da realidade. Essas são utopias da ordem humana, entendidas como um ideal de sociedade a ser eventualmente perseguido e realizado, com maior ou menor sucesso.

Há outras formas de utopia que compreendem configurações organizadas dentro dos cânones científicos. Embora construídos na ciência, satisfazendo as leis físicas convencionais, alguns desses exemplos constituem estruturas consideradas irrealizáveis, concedendo-se a elas, erroneamente, o mesmo tratamento atribuído aos processos que violam alguma lei da natureza. Vamos considerar alguns exemplos.

Ao longo do século XX, os físicos construíram teorias, ou modelos de interpretação de fenômenos, que fazem desabrochar configurações extraordinárias, inesperadas, algumas até mesmo fantasiosas, impossíveis de ser observadas no cotidiano. Embora organizadas no interior da prática científica, elas exibem propriedades tão singulares, tão incomuns, que foram colocadas à margem do discurso convencional da ciência, como se fossem impossibilidades formais, o que não são.

Curiosamente, algumas dessas configurações povoam o imaginário popular, como, por exemplo, a possibilidade de construirmos caminhos que levam ao passado e complexas formulações que representam o Universo como um átomo de um Universo maior.

Essas formas são entendidas como utopias controladas, isto é, processos admitidos no esquema convencional da ciência, identificados como exemplos de configurações de difícil realização. Embora descritas no interior de teorias científicas aceitas, produzem imagens conflitantes não só com o senso comum, mas também com o *establishment* científico. Como consequência, são colocadas no limbo, separadas das afirmações científicas usuais. No entanto, a teoria que sustenta tais processos, aceita integralmente como verdadeira, os torna parte do mundo descrito pela ciência.

A Teoria da Relatividade, de Poincaré e Einstein, a Teoria Quântica, de Schrodinger e Heisenberg, a dinâmica expansionista do Universo, de Friedmann e Hoyle, são exemplos conhecidos, que já fazem parte do imaginário popular, construído a partir da visão autoritária da ciência. Processos descritos no interior dessas teorias permitem que apareçam estruturas que levam a imaginação a empreender voos tão estranhos quanto os sonhos mais esdrúxulos de Joseph K, o personagem de Kafka. São esses exemplos que chamamos de utopias controladas.

Uma característica comum de reação a essas configurações extraordinárias é a repulsa a considerá-las como temas convencionais, mesmo que tais propostas decorram de teorias bem aceitas. Contrariamente ao que ocorria no passado, aqueles que se dedicam ao exame dessas propostas não são excomungados, como Galileu, nem colocados em fogueiras, como Giordano Bruno. Nos tempos atuais, na sociedade do espetáculo em que vivemos, recebem um castigo equivalente à morte em vida: são ignorados pelo *establishment*. Elimina-se qualquer referência a esses projetos, a não ser em mínimas notas de pé de página em alguns poucos textos técnicos. Ou, nos últimos tempos, são tratados como se fossem fantasias delirantes, no limiar do irracionalismo.

Eu me limitarei aqui a citar três dessas “utopias controladas” que pertencem ao domínio da ação gravitacional descrito pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, a saber:

1. A estrutura causal em geometrias que possuem curvas temporalmente fechadas (Gödel), que permitiriam a volta ao passado.
2. A utopia gulliveriana: será o nosso Universo um átomo de um Universo maior? Trata-se de extensões analíticas para fora do Universo (Markov).

3. A utopia dos vários ciclos pelos quais o Universo pode ter passado (Tolman).

Essas configurações têm algo em comum: produzem desconforto formal. Embora se apoiem em conceitos convencionais e em teorias aceitas, tratam de exemplos que povoam a imaginação popular, identificados como estruturas irracionais, fantasiosas, situadas fora da ciência. No entanto, repito, elas estão solidamente apoiadas nos conhecimentos atuais da física.

Antes de analisar esses cenários científicos, faço um comentário genérico sobre a estrutura das leis físicas.

Desde sempre, os cientistas se viram às voltas com as propriedades do que se chamou lei física, que controla os fenômenos da natureza. Embora sua forma possa variar, dependendo do grau de conhecimento que nos permite obter, ela constitui uma estrutura rígida, inabalável, que determina as configurações possíveis no mundo.

É claro que o formalismo com que a descrevemos pode mudar. Isso decorre da incerteza humana. No entanto, o objetivo final da ciência é atingir o cerne da lei e obter sua descrição completa. De tempos em tempos, os cientistas acreditam ter conseguido este objetivo, mas logo percebem que fenômenos novos impõem alterações na forma da lei. Essa variação da lei é convencional e está associada à natureza humana. Não diz respeito às leis do mundo, propriamente ditas.

Ao longo do século XX, foram se acumulando evidências de um tipo de variação mais dramático, ao se reconhecer que essas leis não são as mesmas em todo o cosmos, podendo variar de acordo com sua localização espacial e/ou temporal. Em um primeiro momento, essa variabilidade das leis apareceu como uma fantasia, uma especulação de cientistas renomados – como Dirac, Lattes, Hoyle e outros – que podiam se permitir interpretações pouco comuns de alguns fenômenos, induzindo à possibilidade de aceitar a variação das leis físicas. É importante lembrar que essa variação dificilmente pode ser experimentada na Terra. As leis físicas terrestres não são influenciadas por ela, que só pode ser observada em grandes dimensões do espaço-tempo, pois o tempo de dependência das leis se mede em escala cósmica.

Essas especulações nunca foram de agrado do *establishment*, mas não eram tratadas com repulsa. Aos poucos, no entanto, diversas propriedades mereceram análise tão distinta das convencionais que a variação das leis físicas passou a ser convencional, tornando-se uma importante área de investigação.

A física não pode penetrar nesse reservatório de virtualidades, em que as leis físicas se fazem e se desfazem. Se a ciência quer investigar essas questões, então o instrumento necessário para isso está na cosmologia e na análise dos Universos possíveis que a metacosmologia exhibe. A proposta de Giordano teria então sua versão moderna, semelhante ao que ele caracterizou como a dualidade de natureza e Deus.

Alertados para essa dependência cósmica das leis da física e projetando a natureza histórica das próprias leis da natureza, independentemente de sua formulação na ciência, podemos empreender a tarefa de examinar os três exemplos citados de utopias controladas.

Utopia causal ou a volta ao passado

O exemplo mais marcante de que propriedades da física local, na Terra e em suas vizinhanças, podem não ser válidas globalmente, nos confins do Universo, foi apresentado em 1949 pelo matemático austríaco Kurt Gödel. Em uma conferência em homenagem a Albert Einstein, Gödel apresentou um modelo de Universo no qual o princípio causal vale em cada ponto, mas não vale globalmente.

Localmente, a existência de um limite máximo de propagação de informação, identificado com a velocidade da luz, permite construir configurações tipo cones em uma representação espaçotemporal. A luz propaga-se sobre esses cones, e qualquer forma de matéria e energia só se propaga no interior deles. Cada observador no mundo está associado a um cone no espaço-tempo, que determina a distinção entre passado e futuro para este observador. Assim, a causalidade local é rigorosamente definida.

Entretanto, a força gravitacional que atua sobre os fótons, grãos elementares da luz, distorce a orientação desses cones. O resultado mais dramático, descoberto por Gödel, refere-se à possibilidade de essa deformação impedir a validade global da sentença “ao caminhar para o futuro, afasto-me de meu passado”. Tal verdade, para nós indiscutível, deixa de ser uma verdade global. Gödel mostrou que em certas configurações do campo gravitacional – que não são as de nossa vizinhança terrestre –, ao caminhar para o futuro, eu me aproximo do meu passado, pois a imagem mental do tempo como uma linha reta deve ser transformada na imagem mental de um círculo.

Assim, Gödel mostrou que a ideia utópica de volta ao passado não conflita com a lei física que descreve os processos gravitacionais. Ao mesmo tempo, ele conseguiu a primeira demonstração clara e simples da razão pela qual não é possível termos tal experiência de volta ao passado: o campo gravitacional produzido pela Terra, com características diferentes da configuração descoberta por Gödel, é fraco.

Utopia dos vários ciclos pelos quais o Universo passou

Nos últimos anos, depois de ultrapassar a avalanche midiática que pretendia identificar o chamado Big Bang – um cenário do “começo do mundo”, com a descrição de um Universo extremamente concentrado –, os cosmólogos voltaram a examinar antigas propostas, desenvolvidas nas décadas de 1930 e de 1940, que tratam de possíveis ciclos de expansão e colapso do Universo.

Na ideia original, o físico Richard Tolman examinou a possibilidade de que além da atual fase de expansão do Universo, na qual o volume espacial total aumenta com o tempo cósmico, tenha existido outra fase de contração, na qual esse volume teria diminuído.

A dificuldade em aceitar isso esbarrava na impossibilidade de existir uma continuidade analítica entre a fase de colapso e a fase de expansão. Pois, no momento de passagem de uma fase a outra, a estrutura métrica exibiria uma singularidade que implicaria que toda forma de matéria e energia existente assumiria valor infinito. Do ponto de vista prático, isso significaria que nenhuma informação poderia passar de uma fase a outra. Por isso, o cenário proposto por Tolman foi relegado pela comunidade científica.

Essa dificuldade só foi sanada ao final de 1979, quando surgiram dois cenários pioneiros (Melnikov-Orlov, na ex-União Soviética, e Novello-Salim, no Brasil) que representam configurações de Universos com *bouncing* e sem singularidades. O Universo teria experimentado uma fase de colapso gravitacional, na qual seu volume espacial total teria atingido um valor mínimo, diferente de zero, e em seguida iniciado o atual processo de expansão. A propriedade de ter um volume mínimo distinto de zero elimina a singularidade dos modelos do tipo Big Bang e permite a passagem de toda forma de informação de uma fase a outra.

Superada a dificuldade maior do cenário Big Bang, esses cenários cósmicos permitiram o exame de configurações mais sofisticadas e complexas, nas quais mais de um ciclo colapso-expansão teria acontecido. Questões técnicas novas apareceram e tornaram-se matéria de intensa investigação científica, ainda em curso.

Utopia gulliveriana: nosso Universo é um átomo de um Universo maior?

O Universo é um sistema fechado? Desde sempre, a resposta convencional e óbvia é sim. No entanto, o físico russo M. A. Markov ensinou que pode não ser assim. Na década de 1960, Markov propôs uma solução para as equações da Relatividade Geral que combina uma configuração local com uma global. Descreverei essa proposta, sem entrar em detalhes maiores, que exigiriam uma discussão técnica.

Ela desenvolve-se em quatro etapas, todas associadas a processos gravitacionais controlados pela teoria da gravitação de A. Einstein, gerando o que chamaríamos de múltiplos Universos.

Basicamente, a análise de Markov depende de duas geometrias distintas: o modelo cosmológico de Friedmann e a geometria de Schwarzschild. Já descrevemos a geometria de Friedmann. Vamos nos deter um pouco para descrever essa outra geometria.

Na Teoria da Relatividade Geral, o campo gravitacional gerado por uma estrela, ou melhor, a modificação da geometria no exterior de uma estrela foi descoberta pelo astrônomo Karl Schwarzschild em 1916. Essa solução ganhou notoriedade por conter propriedades inusitadas, que conduziram mais tarde à noção do que se chamou buraco negro. Esse termo foi introduzido por uma propriedade especial: a possibilidade de matéria e energia, sob qualquer forma, ficar aprisionada no interior de um raio R_s que depende somente da quantidade de matéria da estrela.

Expliquemos. Vamos considerar idealmente o campo gerado por uma fonte puntiforme. Trata-se de uma idealização que os físicos fazem, pois permite descrever de forma clara e interpretar de forma simples a situação.

A superfície caracterizada pelo raio pode ser entendida como uma membrana unidirecional que permite qualquer forma de matéria e energia – um corpo qualquer, que chamaremos de C – entrar nessa região interior de R_s , mas impede que dela possa sair. Isso independe da intensidade da força, de caráter não gravitacional, que se aplique no corpo C . Ou seja, nenhuma forma de matéria e energia, inclusive a luz, pode sair da região interna a essa superfície R_s . Assim, essa estrela com dimensão pontual (ou, digamos, de raio menor que R_s) não é visível do exterior. O único efeito de sua existência é o campo gravitacional que produz. É um corpo que não emite luz, é invisível, ou seja, um buraco negro.

Se no exterior dessa estrela a geometria é dada pela forma de Schwarzschild, o que podemos dizer de seu interior? O físico americano Richard Tolman sugeriu pensar esse interior como se fosse um Universo de

Friedmann de uma forma especial: ele seria modificado um pouco, em relação à forma original, para que pudesse ter uma continuação analítica para um exterior, que seria precisamente a métrica de Schwarzschild.

Essa construção formal, a união de geometrias, é de longa data um procedimento legítimo e conhecido dos físicos, por sua analogia com o que ocorre com o campo eletromagnético. Sabemos como se dá a descontinuidade de um campo elétrico ao passar por uma superfície que separa um corpo carregado e um meio externo qualquer.

Assim, teríamos a seguinte configuração: no interior da estrela, a métrica seria do tipo Friedmann e em seu exterior seria da forma Schwarzschild R_s .

Note-se que esta forma de Universo associado ao interior da estrela não pode ser idêntica ao Universo de Friedmann, pois deve conter uma particularidade a mais, capaz de permitir essa configuração externa. Os detalhes técnicos podem ser encontrados nas referências.

A geometria de Schwarzschild representa o campo gerado por uma estrela. Ora, sabemos pela teoria newtoniana que este campo decresce com a distância e se anula em uma distância suficientemente grande (representada pelo termo “infinitamente distante”). Essa característica é explicitada na forma R_s ao reconhecermos que essa métrica R_s coincide no infinito, assintoticamente, com a métrica de Minkowski, plana, isenta de curvatura.

Markov deu um passo além nessa construção ao alterar essa condição no infinito. Ele provoca uma nova geometria para além de R_s , impondo que existe uma extensão, em uma região finita, onde a geometria R_s associa-se, transforma-se e estende-se para outra forma de geometria, distinta da de Minkowski. Markov escolheu a geometria de Friedmann.

É fácil entender o argumento. Ao considerar o campo gravitacional da estrela em uma região muito afastada, a geometria deve ser identificada à do Universo onde essa estrela está mergulhada. Podemos sintetizar a argumentação em quatro movimentos.

Primeiro movimento: análise do campo gravitacional gerado por uma estrela, um corpo compacto em geral. Na região externa do corpo tem-se a solução das equações da gravitação da Relatividade Geral, construída por Schwarzschild. Assintoticamente, muito longe da estrela, a ação gravitacional evanesce e a geometria passa a ser descrita idealmente pela métrica plana, sem curvatura, do espaço-tempo vazio de Minkowski.

Segundo movimento: ainda o campo gravitacional gerado por uma estrela, um corpo compacto. Diferentemente da situação anterior, na região externa constrói-se uma modificação da solução de Schwarzschild, de modo que, muito longe da estrela, a ação gravitacional não desaparece, mas se transforma. Então, a geometria é descrita, de modo mais realista que na configuração anterior, pela métrica de um Universo em evolução, como na geometria de Friedmann. E quanto ao seu interior?

Terceiro movimento: ao interior da estrela associa-se uma estrutura métrica representada por um Universo tipo Friedmann em evolução. Esse interior é então acoplado de modo contínuo à solução do exterior da estrela de Schwarzschild do primeiro movimento.

Quarto movimento: na estrutura anterior do terceiro movimento, a geometria de Friedmann é estendida para o exterior, identificada com uma geometria de Schwarzschild. Esta, por sua vez, é continuada para outra geometria, que representa outro Universo do tipo Friedmann em evolução.

Assim, teríamos uma configuração complexa envolvendo três regiões:

1. Região 1 ($0 < r < R_1$): geometria de Friedmann;
2. Região 2 ($R_1 < r < R_2$): geometria de Schwarzschild;
3. Região 3 ($R_2 < r$): geometria de Friedmann.

O resultado dessa complexa sequência de soluções exatas das equações da Relatividade Geral pode ser visualizado como o interior de um corpo que se integra solidariamente a um Universo maior.

Essa construção de Markov pode ser descrita como se um corpo, uma estrela, um grande conjunto de estrelas, um conjunto de galáxias – identificado a um elemento único compacto ou Universo, juntamente com inúmeros outros corpos semelhantes – estivessem imersos em uma configuração maior, constituindo o que deveríamos chamar de “superuniverso”. É como se o nosso Universo pudesse ser descrito como um átomo de um Universo mais amplo.

Essa construção pode continuar para além das quatro fases de Markov. Com efeito, na década de 1980, minha aluna Regina Célia Arcuri, em sua tese de mestrado no CBPF, examinou a possibilidade de compatibilizar esses Universos em várias camadas. Tal estrutura resultou ser estável e pode efetivamente constituir um modo formal de construção de múltiplos Universos como se fossem camadas, com cada uma delas representando uma dada configuração.

Se é assim, poderíamos imaginar ações entre esses átomos-Universos de modo a permitir que as leis da física pudessem ser extrapoladas para tais configurações. O Universo em que vivemos seria identificado como um

átomo, um elemento de um mundo microscópico que se abriria para complexas e extraordinárias configurações.

17

Comentário

O que podemos concluir desses inesperados exemplos que fomos buscar em configurações físicas pouco conhecidas, mas que satisfazem leis convencionais da ciência? Cada uma delas possui uma versão popular considerada utópica. No entanto, vimos que possuem uma versão científica. Constituem processos aceitáveis, não contraditórios com o conhecimento científico.

Chamamos esses exemplos de utópicos porque configuram situações que se afastam do nosso cotidiano. São idealizações que preenchem um desejo latente, que persiste.

No cenário descrito no espaço-tempo da ciência não é impossível voltar ao passado, fisicamente, em nosso Universo. No entanto, a impossibilidade factual de realizar essa viagem, na experiência pessoal de cada um, faz com que continuemos a qualificá-la como utópica. A utopia não está na minha relação com a natureza das leis físicas, mas sim na resistência a pensar para além de uma ação física no mundo.

Surge a questão: os exemplos que descrevemos aqui, as utopias controladas que têm aval da ciência, retiram do utópico a condição de ser irrealizável?

Elas chocam-se com o senso comum. Embora descritas conforme leis físicas aceitas, parece impossível vivenciar aqueles exemplos. Como experimentar o “lado de fora do Universo”? Como experimentar a “volta ao passado” se devemos, para isso, ter acesso a uma configuração gravitacional especial, distinta da que temos na Terra e em suas vizinhanças? Como vivenciar ciclos passados do Universo?

Podemos comparar essas dificuldades com situações semelhantes que ocorreram na história recente da física.

Há mais de setenta anos, o físico suíço Wolfgang Pauli sugeriu a existência de um novo componente do mundo microscópico, uma partícula elementar que chamou neutrino, um pequeno nêutron. Sua antevisão dessa partícula foi elaborada como consequência da aplicação de leis físicas consagradas, como a conservação da energia. Na época, no entanto, a possibilidade de detectar em laboratório terrestre uma partícula com propriedades tão evasivas parecia praticamente impossível, levando Pauli a se perguntar, logo em seguida à sua sugestão, como seria possível experimentar o neutrino.

Com efeito, o neutrino tem interação tão fraca com a matéria que, no momento em que escrevo, um número fantástico dessas partículas, vindas do cosmos, passam através de meu corpo sem que nenhum rastro de interferência seja revelado. Mesmo assim, nos tempos atuais, o neutrino é observado cotidianamente em inúmeras experiências terrestres e em observações astronômicas.

Sigamos com essa mesma análise. Como experimentar um buraco negro? Era o que se perguntavam os físicos na década de 1970, quando o estudo da evolução de estrelas massivas consolidou a possibilidade de existência desses fantásticos corpos, heranças de estrelas instáveis. Hoje, inúmeros astrônomos tratam a observação de certas configurações localizadas como características convencionais de buracos negros.

A utopia, como usada nesse texto, extrapola a descrição usual, limitada à construção de sociedades perfeitas. Ao estender esse conceito ao estudo de propriedades especiais de regiões do espaço-tempo identificadas com distintas configurações do Universo, relacionamos a física às utopias sociais, permitindo o uso de conceitos deslocados para a frente de suas realizações factuais.

A ciência, com a revolução produzida pela cosmologia nos últimos anos do século XX, apoiada na dependência cósmica das leis físicas, afastando-se da descrição tradicional do mundo, de viés essencialmente antropológico, aproxima-se da utopia de Giordano Bruno. Para ele, ao produzir-se uma leitura do Universo baseada em uma nova ordem estabelecida nesse território global e, consequentemente, induzir-se uma nova visão do papel do homem no cosmos, abre-se o caminho para mudanças profundas na ordem social. Dito de outro modo, ao enfatizar esse aspecto histórico, a ciência deixa aparecer seu lado revolucionário, para além da limitação de seu território de ação.

A partir desses exemplos científicos, e com ênfase na turbulenta gestão da lei da física, transformada em lei cósmica pelo reconhecimento de sua dependência da evolução do Universo, nos preparamos para empreender o grande salto prefigurado por Giordano Bruno na produção de uma nova ordem social.

O que está em questão não é a negação da certeza do outro, mas o jogo de pensar como entretenimento da vida.

O cosmos indeciso (bifurcação e indeterminismo no cosmos)

O processo de bifurcação, a possibilidade de soluções de uma dada equação mostrarem características distintas quando um parâmetro associado passa por um dado valor, foi uma das grandes descobertas feitas pelo matemático francês Henri Poincaré.

Uma das principais consequências da bifurcação foi retirar o caráter absoluto que parecia relacionar intimamente as equações das teorias com as quais os físicos descrevem nossa realidade, de um lado, e o determinismo científico, de outro.

A análise de Poincaré – o modo como ele examinou as propriedades de certos tipos de equações – foi usada em diversas configurações na ciência e na engenharia. Chamou a atenção dos filósofos quando foi usada na compreensão de algumas transformações químicas, pois tornou-se claro, para além da comunidade científica, que o determinismo na ciência perdera seu caráter absoluto, pelo menos em fenômenos reproduzidos em laboratório.

Depois de quase quinhentos anos de descrição determinista dos processos clássicos, a ciência foi levada a aceitar a entrada do indeterminismo na descrição das leis terrestres. E quanto aos fenômenos no Universo?

Uma análise semelhante só foi possível neste século, quando o processo de bifurcação foi finalmente descoberto em processos globais na cosmologia, no chamado “Universo viscoso”. Abriu-se então um novo território no pensamento sobre o mundo. Não se tratava mais de explicitar o indeterminismo em processos limitados, de dimensão humana, mas sim no sistema de equações que descreve a dinâmica da geometria do espaço-tempo global, o Universo. Curiosamente, os filósofos, desatentos, não se interessaram em ouvir os cosmólogos e se informar sobre esse abandono do determinismo em nível cósmico.

Existem momentos na evolução do Universo que estão relacionados a regimes radicais, que envolvem situações catastróficas. Sabemos, por exemplo, que no passado remoto, quando o Universo estava extremamente condensado e seu volume total era muito reduzido – fase apelidada de Big Bang –, puderam-se observar fenômenos únicos, associados a intensidades energéticas jamais reproduzidas.

Um desses fenômenos, ainda pouco conhecido, está associado ao que os matemáticos chamam de bifurcação, uma manifestação típica de certas configurações não lineares. Esta teoria também foi desenvolvida por Henri Poincaré, o mesmo que realizou importantes estudos sobre a estrutura das equações que descrevem correlações entre observadores inerciais e que possibilitou o aparecimento da grande síntese feita pelo físico alemão Albert Einstein em sua Teoria da Relatividade Especial.

A presença de um ponto de bifurcação em um sistema de equações que descrevem um processo físico assinala a quebra do determinismo e a instalação de uma imprecisão sobre o futuro deste processo. Como o nome explicita, o fenômeno da bifurcação significa que o sistema em questão pode evoluir para dois caminhos distintos. Ou seja, ele está em presença de uma encruzilhada.

No livro *La Nouvelle aliance*, que teve grande repercussão entre estudiosos das ciências humanas, o químico Ilya Prigogine e a filósofa Isabelle Stengers sugerem uma estreita conexão entre as ciências da natureza e as ciências humanas. Mais do que isso, Prigogine alerta para o mal que a separação entre esses distintos modos de análise da realidade causou em ambas as áreas. O ponto crucial dessa obra, que permitiu expressar a necessidade dessa união de forma contundente, baseou-se precisamente na teoria matemática da bifurcação.

No entanto, a bifurcação examinada por Prigogine limitava-se a processos descritos em laboratórios terrestres, o que lhe dava um caráter restrito, pois o alcance desta indeterminação podia ser controlável. A descoberta de cenários do Universo que satisfazem as equações da teoria de Einstein da Relatividade Geral, apresentando bifurcações, produz uma dificuldade de outra dimensão na compreensão da cosmologia.

A origem do cenário cosmológico com bifurcações baseou-se no mecanismo de criação de matéria pela gravitação. Com efeito, flutuações do campo gravitacional em momentos energéticos intensos, como aqueles que ocorreram nos primórdios da atual fase de expansão do Universo, produzem partículas de diversas espécies. A distribuição de energia dessas partículas recém-criadas é descrita como um fluido viscoso. Assim como ocorre no fenômeno de laboratório descrito por Prigogine, tal viscosidade contém o germe da bifurcação.

Esses comentários sugerem que o Universo requer, de tempos em tempos, uma liberdade que o determinismo das leis físicas, criadas pelos homens, pretende restringir.

Isso não impede que se elabore uma descrição racional completa do cosmos, mas implica a necessidade de se colocar a história no centro de toda análise cósmica. Tal exigência é coerente com o conhecimento científico atual, que levou à certeza do caráter dinâmico da expansão do Universo, o que implica a alteração de suas propriedades globais com o passar do tempo cósmico.

Trazendo para a cena central da descrição do Universo o fenômeno da bifurcação, a ênfase na história torna-se mais explícita.

Embora uma visão determinista da realidade física tenha sido enfraquecida com o surgimento da descrição quântica, ela ainda permanece atrativa para alguns quando se trata de configurações clássicas, nas quais o papel dos processos quânticos se reduz, como ocorre na cosmologia. No entanto, do que acabamos de comentar pode-se inferir que o Universo, sua evolução e a possibilidade de sua descrição racional completa não estão determinados *a priori*, mas exigem um acompanhamento de sua evolução e um conhecimento das alternativas que lhes são oferecidas aleatoriamente. Ou seja, assim como a história é essencial para se compreender a sociedade humana, a verdadeira descrição do Universo também é histórica.

Universo viscoso

Em agosto de 1982, na conferência Teorias Relativistas do Universo realizada em Xangai, na República Popular da China, apresentei os resultados de um artigo que havia escrito no início daquele ano, junto com minha colaboradora Ligia Maria Rodrigues. Sem entrar em detalhes técnicos (cf. referências), vamos rever algumas conclusões daquele trabalho.

O campo gravitacional é capaz de criar partículas mate-riais a partir do vácuo. Como se pode descrever a distribuição energética espacotemporal dessas partículas criadas? A resposta veio de antigas teorias dos fluidos, usadas em processos clássicos nos quais a viscosidade é um fator importante. Os detalhes estão descritos no artigo citado, mas podemos adiantar que sua energia se comporta como um fluido imperfeito com viscosidade.

Ao tratar dessa forma a distribuição de energia da maté-ria criada pela curvatura do espaço-tempo, usando a Relatividade Geral, podem-se reduzir as equações, descrevendo esse processo como um sistema dinâmico planar (no qual existem somente duas equações) e autônomo (sem nenhuma função explícita do tempo). Usando-se o método de Poincaré, uma análise desse sistema permite mostrar como aparece o fenômeno da bifurcação.

Nas vizinhanças do ponto de bifurcação, o caminho de evolução depende de eventuais flutuações, perturbações com caráter aleatório. Para dar uma imagem simples do que acontece, poderíamos dizer que o Universo se torna hesitante e escolhe um caminho de evolução de modo fortuito. Tal interpretação só ganha real significado se pensarmos coleções de mundos em evolução, isto é, distintas configurações de Universos possíveis. Somos levados a aceitar a historicidade, ou seja, a dependência histórica das leis do Universo, cuja evolução não se subordina às condições iniciais, quaisquer que sejam.

O cosmos solidário I

O que podemos concluir desse sobrevoo em algumas questões fundamentais da cosmologia?

Ela destruiu a paz racional que a ciência organizou ordeira, paciente e eficientemente nos últimos quatrocentos anos, conduzindo à imagem de um Universo pronto, controlado por leis físicas eternas. Se o Universo está ainda em construção (não só fenomenologicamente, mas pela dependência cósmica de suas próprias leis), ele deve ser compreendido em um cenário de solidariedade.

Como se deve entender isso? Talvez a melhor palavra seja coerência. No entanto, há mais do que isso, como podemos entender com poucos exemplos.

Quando Einstein elaborou o primeiro modelo cosmológico do século XX, considerou a hipótese de não haver interação das partes do Universo. Aceitou então que a fonte principal da geometria do espaço-tempo global deveria ser um fluido perfeito, caracterizado somente por sua densidade de energia constante. Não haveria pressão nesse fluido cósmico.

Como consequência dessa ausência de interação de suas partes e de o fato ser estático, inalterado, o modelo do Universo de Einstein é instável, ou seja, não persiste por muito tempo. Dito de outro modo, não teria tempo de existência suficiente para permitir a criação de estruturas como galáxias, estrelas, planetas e vida.

Somente quando um cientista russo, Alexandre Friedmann, produziu um modelo de Universo dinâmico é que se pôde perceber a importância da geração controlada de instabilidades capazes de fazer evoluir pequenas perturbações até se formarem estruturas como as que existem hoje nos céus.

Para isso, formas variadas de interação, simplificada e descritas com a presença de pressões internas, tiveram papel importante.

Sugiro chamar “solidariedade cósmica” esse processo de evolução controlada, através da interação de diferentes partes do Universo.

Reconhecemos, assim, a solidariedade como um princípio fundamental do cosmos, na tentativa de descrever os misteriosos processos no Universo por meio de leis cósmicas.

Talvez devêssemos lembrar que no Universo encontramos diversas catástrofes cósmicas, como galáxias que se devoram, estrelas que colapsam e se transformam em buracos negros etc.

Esses exemplos parecem contradizer a tese da solidariedade do cosmos. No entanto, eles são sempre questões locais. Não envolvem a globalidade do cosmos, à qual se associa a solidariedade a que estamos nos referindo.

Embora a analogia com a situação da espécie animal seja ineficiente, eu ousaria considerá-la somente para relatar a dicotomia local-global e suas diversas aparências no Universo e nas relações entre animais. Registradas as consequências do comentário acima, vejamos o que diz André Pichot sobre a dualidade egoísmo-altruísmo na espécie animal.

Le darwinisme est considéré comme totalement égoïste, car il suppose une lutte sans merci entre les individus, dont seuls les plus aptes à vivre sortiront vainqueurs. Autrement dit: chacun pour soi, la sélection reconnaîtra les meilleurs. Pour sortir de cet égoïsme tout en conservant les principes darwiniens, il fallait donc imaginer un comportement altruiste héréditaire ayant une valeur sélective supérieure à celle de la lutte de tous contre tous; un comportement conférant aux individus le pratiquant un avantage tel que l'évolution le conserverait. Wallace trouva ce comportement altruiste dans l'entraide entre les individus d'un même groupe social (il dit "tribu").

En effet, selon lui, une telle entraide entre ses membres permet à la tribu de plus facilement survivre dans la lutte pour la vie, comparativement aux tribus dont les membres ne s'entraident pas, tribus qui sont donc moins solidement soudées face à l'adversité.

O darwinismo é considerado totalmente egoísta, pois pressupõe uma luta impiedosa entre os indivíduos. Somente os mais capazes de viver sairão vitoriosos. Em outras palavras: cada um por si, e a seleção reconhecerá os melhores. Para sair desse egoísmo, mantendo os princípios darwinianos, era necessário imaginar um comportamento altruista hereditário com um valor seletivo maior do que o da luta de todos contra todos; um comportamento que conferisse tal vantagem aos indivíduos que a evolução o conservaria. Wallace encontrou esse comportamento altruista na ajuda mútua entre indivíduos do mesmo grupo social (ele chamou de “tribo”).

De fato, segundo ele, tal ajuda mútua entre os membros torna mais fácil que a “tribo” sobreviva na luta pela vida, em comparação com “tribos” cujos membros não ajudam uns aos outros, “tribos” que estão menos firmemente unidas diante da adversidade.

Ou seja, o individualismo pessoal transferiu-se para o egoísmo do grupo. Para preservar o grupo, um altruísmo instalou-se individualmente.

No caso do Universo, a solidariedade global requer que as catástrofes acima apontadas sejam sempre localizadas, limitadas no espaço e no tempo, e que possam ser incorporadas como pequenas oscilações no território maior do cosmos. É nessa perspectiva que devemos entender os diversos ciclos do Universo.

Quando isso não acontece, quando essa solidariedade global não se instala, o resultado é uma catástrofe global, e o Universo se destrói. O exemplo mais simples é o cenário cosmológico de Einstein.

O cosmos solidário II

No livro *La Solidarité, enquête sur un principe juridique*, Alain Supiot coordena um exame cuidadoso da evolução do conceito de solidariedade, estendendo-se desde as longínquas origens jurídicas do termo até questões atuais em diversas áreas, como biologia, sociologia e política, e em diferentes lugares e épocas.

Nesse livro, Supiot apresenta diversos aspectos da solidariedade na biologia e a compara com o uso na sociologia, num quadro de analogia darwiniana.

A relação da solidariedade com a física é uma ausência notável. Curiosamente, ela é entendida como natural, pois solidariedade é um conceito que não seria aplicável ao Universo, mas somente às espécies vivas.

No entanto, a cosmologia permite a aplicação do conceito de solidariedade ao Universo. Mais do que isso, ele pode contrabalançar o papel autoritário e arrogante de uma proposta que pretende dar ao Universo um sentido eminentemente antropomórfico com o uso do princípio antrópico.

Neste caso, solidariedade pode ser entendida como compatibilidade, coerência no sentido da matemática e da física. Vejamos o que aparece no Manifesto Cósmico.

Até pouco tempo, a microfísica e, de modo mais amplo, a física terrestre eram pensadas fora do contexto cósmico. Elas pareciam dispensar qualquer explicação ulterior, sendo tratadas como sistemas autorreferentes, sem admitir qualquer forma de análise extrínseca para constituir uma razão autoconsistente. No entanto, nas últimas décadas, a cosmologia invadiu abruptamente esse domínio tranquilo do pensamento positivista dominante e destruiu a paz racional daqueles que acreditam que a Terra e os homens têm um papel especial no Universo.

Essa interferência cósmica na física local não deve ser entendida como a substituição de uma razão absoluta por outra razão absoluta. Não se trata de trocar o absolutismo associado ao caráter universal da física local pelo absolutismo de uma física global. A questão é um pouco mais complexa. O matemático A. Lautman faz uma bela síntese do que está em jogo em seu livro *Essai sur les notions de structure et d'existence en mathématiques*. Ao examinar a dicotomia local-global, ele propõe uma alternativa muito interessante, com consequências tentaculares, referindo-se à possibilidade de produzir uma síntese orgânica entre diferentes teorias matemáticas que tratam das conexões local-global e escolhem o predomínio de uma sobre a outra. Lautman argumenta que é preciso estabelecer uma ligação poderosa entre a estrutura do todo e as propriedades das partes, de modo que nessas partes se manifeste de modo claro e preciso a influência organizadora do todo ao qual elas pertencem. Esse ponto de vista, que parece adotar ideias e programas retirados da biologia ou da sociologia, pode aparecer na matemática como um procedimento de síntese. Para isso, devem-se abandonar tanto o programa de Russel-Whitehead, de reduzir a matemática a estruturas lógicas atomísticas, quanto a visão de Wittgenstein e Carnap, segundo a qual as matemáticas nada mais são do que uma linguagem, indiferente ao conteúdo que exprimem. Algo semelhante ocorreu na cosmologia relativista na última década, com o abandono da axiomatização Penrose-Hawking, que foi estruturada para apoiar a identificação da existência de um momento único de criação do Universo, momento separado de nós por um tempo finito.

Em outro lugar, me estenderei sobre esse caminho que Lautman propôs. Aqui, ele serve somente como citação, como um exemplo de análise do que está acontecendo no território da cosmologia, para apontar que essa questão transcende o nosso plano de exame das questões da física e, na verdade, constitui uma área de reflexão em diversos territórios do conhecimento. Ou seja, mais uma vez nos deparamos com limites incertos de uma questão bem definida em um território, mas que permite uma análise especial em outro território. Embora distintas, essas questões tratam de algo que aproxima os diferentes modos de compreender a realidade e constituem o conjunto das ciências, as da natureza e as humanas. Exemplos dessas ideias têm sido examinados nos últimos anos.

Isso coloca todos nós – físicos, cosmólogos e pensadores de outras áreas – como grandes companheiros em uma caminhada maravilhosa rumo à compreensão do Universo, tendo por base a ideia de que a natureza possivelmente ainda está em formação – não somente em processos e fenômenos, mas no que diz respeito à constituição de suas próprias leis.

Surge, então, a questão: como mudam as leis? A estabilidade das leis da física observadas em laboratórios terrestres decorre do fato de que sua dependência do tempo envolve tempos cósmicos. Isso significa que somente olhando o Universo em grande escala podemos observar esse processo de modificação. Exemplos importantes para

detectar essa evolução são a análise da nucleossíntese que determina a abundância dos elementos químicos no Universo, bem como o exame dos processos que deram origem ao excesso de matéria sobre antimatéria, fenômenos excepcionais, que ocorreram em um estágio extremamente denso do Universo, nos primórdios da atual fase de expansão.

Como é possível entender solidariedade como a pedra de toque para a aplicação da regra de ouro de Lautman na compatibilização entre o micro e o macrocosmo, entre as propriedades das partículas elementares e as características globais, topológicas, do Universo?

O modo natural de empreender essa tarefa seria examinar algumas questões formais que requerem desenvolvimento especializado (como origem da massa, não linearidade, dependência cósmica das interações etc.). Deixarei isso para um curso mais técnico. Farei somente um breve sobrevoo na questão.

Há certas dicotomias que são levadas a um exagero em suas representações e na avaliação de sua importância. Isso será feito aqui, em um primeiro momento, para que possamos discursar livremente e construir de imediato a questão a ser examinada.

Um exemplo típico, que aparecerá frequentemente, é a relação entre uma forma de atomismo e o pensamento global, ou, de modo mais amplo, entre propriedades locais e características globais.

A física de altas energias, também chamada de física de partículas elementares, constitui a atual depositária de um discurso antigo, que de modo simples e provisório podemos descrever como o primado do local. Com essa denominação, sintetizamos diferentes ideias que têm uma configuração básica comum: tudo o que existe é construído a partir de umas poucas unidades fundamentais. Com o passar do tempo e a evolução da ciência, essas unidades mudam de configuração e seu número pode variar. Eram chamadas de átomos nas primeiras décadas do século XX; hoje, são outras formas de elementos fundamentais, denominadas léptons e quarks.

Em oposição, para simplificarmos a dicotomia forjada nesta batalha, encontra-se o modo global, que identificaremos pelo termo cosmologia.

A entrada em cena de um matemático imaginativo: A. Lautman

A análise de diversos processos físicos – originalmente retirados da mecânica teórica ou de outras áreas da física – faz aparecer um princípio-guia: a inércia provoca a ilimitada permanência em um estado estável. Ao aplicarmos esse princípio não somente a partes compactas, regiões limitadas, mas à sua mais completa extensão, o Universo, essa entidade global que ousaríamos chamar provisoriamente de totalidade, produzimos um critério absoluto de constituição das leis físicas, associado a esse tempo ilimitado de existência. Segue então a inesperada concepção de que o Universo parece perseguir o caminho que leva à duração eterna. A quebra da continuidade, com a perda da eficiência da solidariedade, leva o Universo à autodestruição, restando o vazio, que servirá para outra tentativa de construção de um cosmos, de forjar um mundo. E, assim, indefinidamente.

Podemos entender o uso do conceito de solidariedade quando observamos a formulação dos princípios da matemática moderna por Lautman. Trata-se, resumidamente, de conciliar propriedades locais e globais. Para que essa compatibilidade seja bem-sucedida, uma troca eficiente de informação deve percorrer o Universo. De outro modo, deveríamos aceitar que o controle da evolução do Universo estaria dado por um determinismo *a priori*, relacionado a desconhecidas condições iniciais de estruturas locais de equações diferenciais.

Essa solução de compatibilização lautmaniana pode não ter um sucesso absoluto. Tal perspectiva faz surgir a ideia de uma eficácia limitada da compatibilização lautmaniana. Dito de outro modo, é possível imaginar que o Universo tenha passado por várias fases ou ciclos, cada um deles podendo ser caracterizado por um número S (de solidariedade, no sentido de Lautman) cujo domínio de valor deve ser posto entre zero e um, o valor zero sendo o menos solidário, o menos competente na conciliação entre propriedades locais e globais, e o valor um sendo o máximo de compatibilidade possível, o limite idealizado de Lautman.

Entendemos assim a aplicação desse critério ao Universo. Ele pode ser exemplificado com outras configurações menos abrangentes, como, por exemplo, no processo pelo qual um gás, ao ser colocado em um frasco, dilui-se e ocupa todo o volume disponível. As forças localizadas organizam-se para permitir essa configuração. Podemos também usar procedimentos estatísticos para compreender esse fenômeno. Mas os detalhes local-global não são importantes para essa análise. O que importa é o resultado final, que permitiu gerar a dispersão do gás no espaço determinado pelo frasco que o contém.

Essa compatibilidade não é organizada *a priori*, mas decorre de processos relativos à relação local-global. A física estatística apresenta uma versão desse processo, independentemente do conhecimento dessa relação,

incluindo cada etapa necessária para atingir a situação de equilíbrio final, ou seja, a ocupação completa, pelo gás, do volume que lhe foi imposto, sua fronteira global.

Para entender de modo simples a compatibilidade da ordem que parte do local para o global e a situação inversa, que vem do global para a estruturação do microcosmos, modificaremos uma parábola que Newton usou para exemplificar sua ordenação das leis físicas.

Metáfora do túnel da Mancha

Os engenheiros sabem como conciliar a construção de um túnel executado simultaneamente a partir de ambos os lados de uma montanha, para que o encontro dos dois buracos seja harmonioso, de modo que eles se encaixem corretamente. É preciso haver técnica e arte para fazer isso.

Se um deles estiver acima do outro, será necessário fazer um desvio que provocará defeitos futuros e gastos adicionais não previstos. Para evitar essas dificuldades e tornar todo o processo compatível, os engenheiros devem atuar com máximas atenção e competência.

Uma disfunção análoga, associada a este tipo de dificuldade, também poderia estar presente se não houvesse compatibilidade das leis físicas do microcosmo, no nível das partículas elementares, e do macrocosmo, na estrutura global do Universo e, em particular, em sua topologia.

Assim como devem existir uma profunda solidariedade e cooperação entre os esforços dos engenheiros de um e do outro lado da montanha, também no Universo a solidariedade local-global é fundamental para que perturbações esporádicas não cresçam sem controle, gerando uma condição de instabilidade sem limite. Isso é o que acontece, por exemplo, no modelo cosmológico de Einstein, elaborado tendo como fonte da geometria do Universo somente matéria ponderada, sem interação de suas partes, sem pressão: a ausência de solidária interação entre as partes o torna altamente instável.

Na teoria das equações diferenciais não lineares, Poincaré mostrou como é possível existirem certas soluções especiais que funcionam como verdadeiros atratores. Isto é, qualquer que seja o início de um processo descrito por essas equações, é grande a probabilidade de que ele termine como o estado estável que serve de atrator.

Situação semelhante ocorre na cosmologia que estamos examinando, o que leva à característica de que essa atração irresistível afeta a evolução das leis físicas.

A diminuição ou mesmo a ausência da solidariedade local-global está associada à instabilidade. Um Universo sem interação é instável por perturbações que sempre podem ocorrer por flutuações locais, levando-o à autodestruição. Como já comentamos várias vezes, tal é o cenário cosmológico estático de Einstein. Sem relação dinâmica entre suas partes, ele está fadado a uma existência limitada.

Diferentemente, o Universo de Friedmann – mesmo possuindo um horizonte, ou seja, mesmo sem ter uma completa conexão entre todas as suas partes – permite uma estabilidade maior. A ação de eventuais perturbações não o destrói, mas sim permite o surgimento de estruturas como galáxias, estrelas, planetas e vida.

Além da crítica

A cosmologia destruiu a paz racional que a ciência organizou nos últimos quatrocentos anos, que conduziu à imagem de um Universo pronto, controlado por leis físicas eternas. Se o Universo ainda está em formação (não só fenomenologicamente, mas pela dependência cósmica de suas próprias leis), ele deve ser compreendido em um cenário de solidariedade, usando a analogia que fizemos na análise da solidariedade maior, tal como Pichot argumentou.

A função desestabilizadora da cosmologia deve ser entendida à luz do conceito de coerência solidária, um princípio fundamental do cosmos, que orienta as nossas tentativas de desvendar o mistério das leis embutidas no Universo.

O todo e as partes

1. Devemos rever a questão que aflige alguns pensadores, como Nietzsche descreveu em sua programação inacabada sobre a teleologia de Kant, ao afirmar: “O todo não condiciona necessariamente as partes, enquanto as partes condicionam necessariamente o todo.”

2. Ou, ao contrário, devemos ouvir atentamente o matemático-filósofo Lautman, que nos conduz a aceitar uma simbiose benéfica a ambos, às partes e ao todo. A cosmologia traz à cena a afirmação de que podemos identificar o Universo com uma estrutura riemanniana quadridimensional espaço-tempo que constitui um substrato material para descrever iterativamente todos os processos que chamamos realidade.

3. Nossa questão não é se essa totalidade resiste ou não aos ataques dos filósofos. Ela não é relevante, pois aqui se trata preferencialmente de incentivar o diálogo. Se as posições de uns e outros são opostas, devemos entendê-las como uma questão formal, passageira. O diálogo deve permanecer. Através de Lautman, é a matemática que se intromete para gerar um modo comum a físicos e filósofos, para que eles tratem a questão das partes e do todo neste diálogo.

Metacosmologia ou esboço de conclusão

*Este particular mundo em que vivemos
terminará não com um estrondo, não com um
colapso total, mas com um lamento.*
T. S. Elliot

Dissemos que a cosmologia trata da aplicação de leis físicas (dependentes do espaço-tempo ou não) ao Universo para explicar observações de natureza global. A metacosmologia coloca questões do tipo: “Por que a massa do nêutron tem precisamente este valor? Por que existe matéria e não antimatéria no Universo? Existe somente um Universo? Pode ter existido uma fase anterior? Alguns restos desses Universos anteriores ainda podem estar perambulando pelo cosmos atual? Por que existe alguma coisa em vez de nada?”

Agora, podemos entender melhor algumas dessas questões que ficaram pelo caminho. A cosmologia afasta-se da tradição científica por razões não somente factuais (não fazemos experiências com o Universo, mas somente observamos o que acontece em regiões além de nossa galáxia) e coloca questões inesperadas: Como o Universo terminará? Se ele não tiver um fim em um tempo finito, como serão suas características no futuro? Como entender a variação das leis físicas? Podemos estabelecer uma ontologia completa do cosmos?

Criação da matéria e criação da estrutura métrica do espaço-tempo

Contrariamente ao que a tradição afirma, a geometria do mundo tem uma ontologia que deve ser procurada paralelamente e em comunhão com a ontologia da matéria. Quando tratamos de criação da métrica, estamos nos referindo à proposta da Relatividade Geral que identifica aquilo que desde Newton chamamos de força gravitacional, com a curvatura de um espaço-tempo possuindo uma geometria riemanniana.

Não temos uma teoria unificada sobre a formação dessas duas estruturas. A cosmogonia, a formação da substância do mundo, ainda é uma parte da ciência que não está suficientemente desenvolvida. Só temos conjecturas. Nas últimas décadas, nosso conhecimento da microfísica evoluiu bastante, com a classificação das diversas formas de partículas e de algumas de suas propriedades. No entanto, isso não nos permite adentrar a questão de como foram criadas. Não temos uma teoria plena, completa, capaz de explicar a formação e a origem da matéria no Universo. Algumas ideias têm sido discutidas. Vamos examinar algumas delas.

Começamos por estabelecer uma hierarquia entre esses dois processos de criação. Alguns cientistas preferem imaginar que toda a matéria existente no Universo foi gerada a partir de flutuações do vácuo (um vácuo específico para cada substância) e implementada pela curvatura do espaço-tempo. Nessa perspectiva, a geometria teria uma ontologia superior, e sua origem deveria ser procurada independentemente da matéria. Isso coloca uma questão de princípio, pois segundo a Relatividade Geral, a característica mais fundamental da geometria, a curvatura do espaço-tempo, é produzida pela matéria.

Há uma saída simples para escapar dessa dificuldade. Ela ocorre da não linearidade das equações que controlam a evolução da geometria do mundo. Com efeito, como o físico norte-americano Kasner mostrou, é possível haver curvatura não trivial, isto é, representando um Universo dinâmico, sem que haja necessidade de matéria para gerar essa métrica.

Podemos imaginar que uma flutuação do vácuo pode ser amplificada pela gravitação. Uma interpretação pictórica deste processo pode ser vista na figura 25. No primeiro momento, sem a interação gravitacional, um fóton se metamorfoseia em um par virtual elétron-pósitron. Ele é dito virtual, pois, naquele instante de sua efêmera existência, não precisa obedecer às leis convencionais que toda partícula real deve satisfazer. Isso se deve ao princípio de incerteza, de Heisenberg. Em um momento seguinte, esse par elétron-pósitron recombina-se no fóton. Na figura 26, na presença de um campo gravitacional, este impede a recombinação da matéria virtual, que assim

ganha aquilo que chamamos realidade e passa a existir por um tempo maior do que o princípio de incerteza lhe permitiu enquanto par virtual.

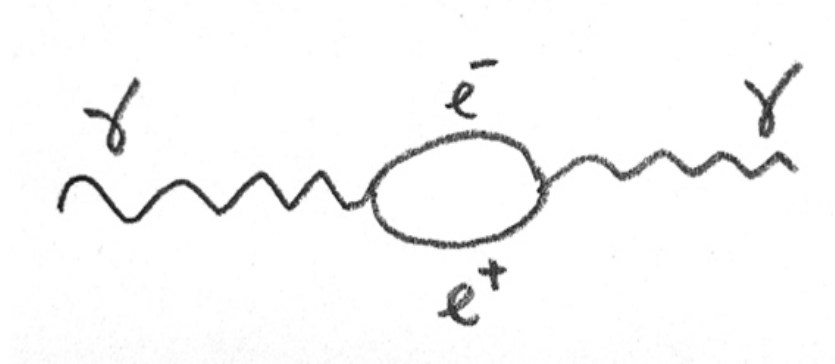


Figura 25

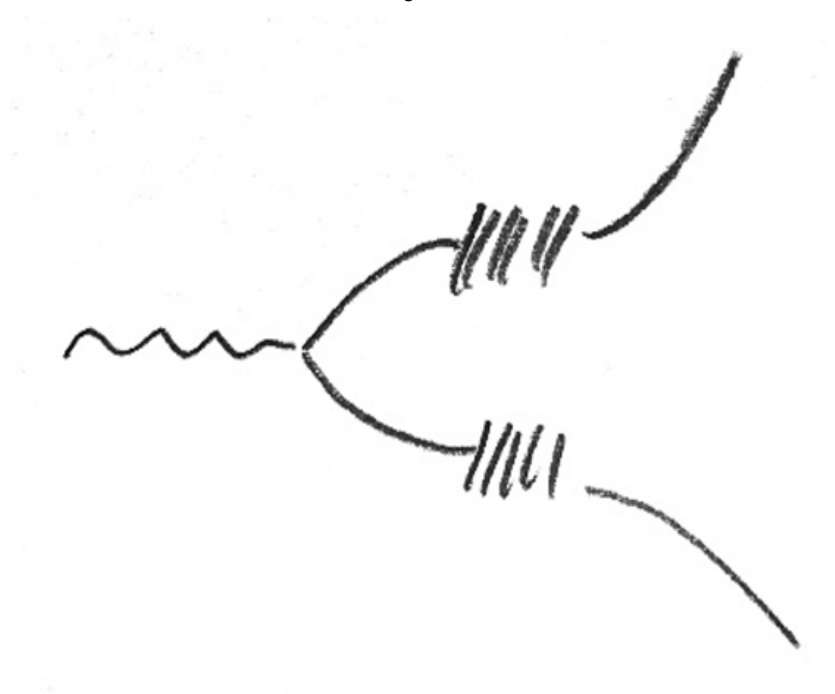


Figura 26

Compreendemos a razão para essa separação quando reconhecemos que a curvatura do espaço-tempo pode ter papel importante nesse processo, através do que chamamos acoplamento não mínimo. Como a variação da curvatura, mesmo em um domínio extremamente reduzido, pode ser grande (como ocorre nos primórdios da atual fase de expansão do Universo), essa ação gravitacional distinta entre os componentes do par virtual pode permitir a separação, dando origem à matéria real.

A questão é saber quão eficiente é esse sistema e por que não vemos uma criação contínua de matéria, como queria Fred Hoyle. Se me refiro a Hoyle aqui é porque ele foi um fervoroso adepto de um mecanismo de formação de matéria para permitir que certa ideia apriorística da estrutura métrica do Universo pudesse ocorrer. Ele opunha-se fortemente à ideia do Big Bang e não entendia por que os físicos preferiam aceitar que toda a matéria do Universo tenha sido criada em um só momento (uma singularidade impossível de ser descrita por uma equação regular), em vez de ser criada continuamente ao longo de sua existência (um cenário descrito por processos bem conhecidos na física). Essa ideia encontrava sua versão geométrica na fórmula “geografia não importa e história não importa”.

Com essa expressão se pretendia afirmar que o Universo era homogêneo não somente no espaço, mas também no tempo: a mesma configuração espacialmente homogênea se repetiria indefinidamente no tempo. Tal geometria havia sido descoberta por De Sitter ao mostrar, logo após a publicação do artigo do modelo estático de Einstein,

que a presença somente da constante cosmológica, sem matéria de qualquer outra forma, pode gerar um Universo dinâmico que se expande indefinidamente, conservando sempre a mesma configuração. As observações das últimas décadas eliminaram essa proposta cosmológica de Hoyle.

O Universo está se expandindo aceleradamente? Por quê?

Aparentemente, as observações confirmam essa informação. A questão maior consiste em saber o que poderia estar causando essa aparente repulsão cósmica. Já vimos alguns exemplos de como processos que imitam uma repulsão gravitacional podem ser construídos. Entre eles, podemos citar a constante cosmológica, um campo escalar acoplado não minimamente à curvatura do espaço-tempo, um campo eletromagnético não linear em regime magnético e a influência de outras quantidades associadas à curvatura como invariante topológico.

O que podemos dizer sobre o futuro do Universo?

Em alguns cenários, o longínquo final da evolução do Universo é semelhante ao seu início: um vazio de matéria em uma estrutura geométrica desprovida de curvatura (geometria de Minkowski). Isso implica a existência de ciclos.

As propriedades desse Universo permitem dizer que ele é “natural”?

Alguns físicos propõem essa questão por analogia com as configurações de um gás composto por um conjunto qualquer de moléculas. O gás tem tendência a ocupar todo o recipiente que o contém, e a distribuição espacial de suas moléculas é homogênea.

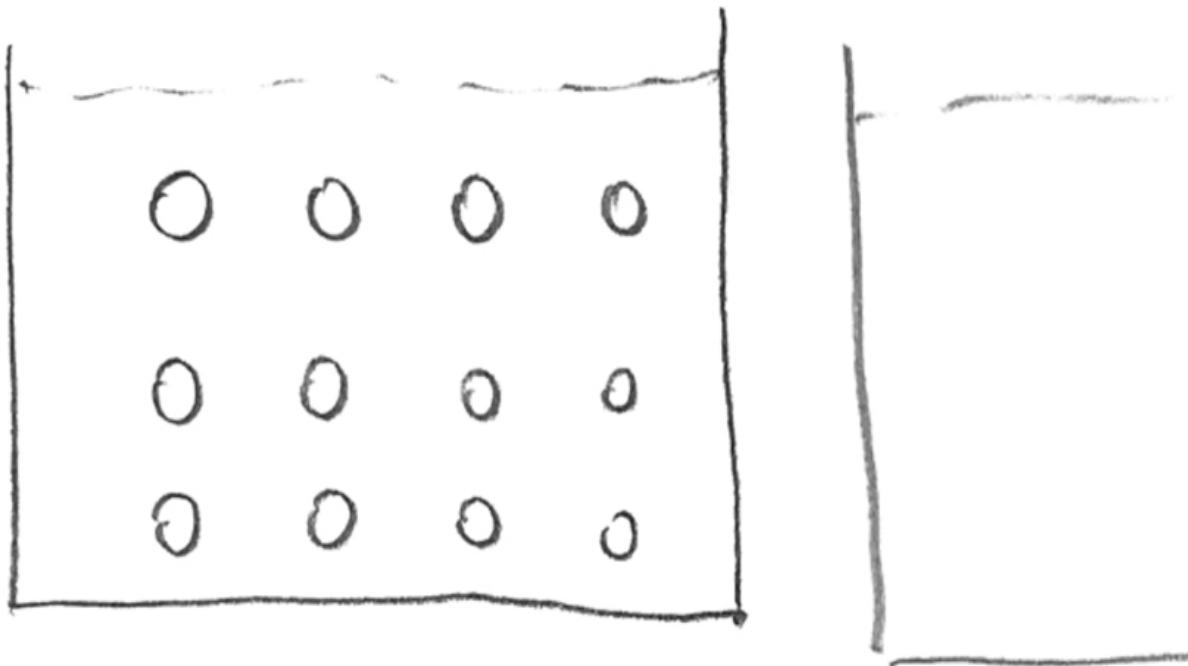


Figura 27

Fig

Na figura 27, vemos a configuração A. Na figura 28, vemos a configuração B.

A configuração A, que mostra maior desordem, é natural, mas a configuração B exige uma explicação. Alguma ação externa, alguma força estaria provocando a aglomeração das moléculas na parte superior do recipiente. Entendemos essa condição natural com base em probabilidades de eventos, como foi estabelecido na lei da entropia. A entropia em A é maior do que a em B. Dito de outro modo, mais configurações levam a A do que a B.

Nesse cenário, alguns físicos se perguntam se o nosso Universo é *natural*. Para entender essa questão, devemos partir da hipótese de que este Universo pode não ser único. Outros Universos, com outras leis e outras configurações possíveis, com tempos de existência distintos, podem ter existido. Alguns desses possíveis mundos nos pareceriam não naturais, com características especiais. Mas surge a questão: o que seria especial em uma configuração? Podemos aplicar esse tipo de questão a entidades como essa, o Universo relativista?

Concebido como inacabado, o Universo poderá se organizar, completando-se, ou seja, deixando para trás essa historicidade reconhecida? Há vários cenários, como o do *bouncing*, que já descrevemos, no qual o Universo é, foi e será eternamente inacabado.

O processo de variação das leis tem um objetivo? Afim, por que as leis variam?

As leis físicas que organizamos nos laboratórios terrestres estruturam-se na Relatividade Especial. A razão é simples: o campo gravitacional na Terra é muito fraco. Para estendê-las ao Universo, é preciso conhecer o modo como um processo físico é descrito em um campo gravitacional.

Uma hipótese bastante restritiva foi aceita: elas deveriam ser generalizadas para aplicação na presença de campos gravitacionais baseados no princípio de equivalência. Esse princípio permite eliminar localmente o efeito da gravitação por uma simples escolha de como representar o sistema de coordenadas.

A hipótese de que a extensão das leis físicas ao Universo pode ser feita sem nenhuma referência à curvatura da métrica é chamada acoplamento mínimo com a gravitação.

Quando o acoplamento envolve a curvatura, isso transcende a Relatividade Especial. Podem aparecer novas propriedades dos processos físicos, como violação da conservação de bárions, violação da regra de quebra máxima de paridade nas interações de decaimento ou de Fermi (fraca) e outras.

Em verdade, o que chamamos lei física descreve somente uma parte dos processos dinâmicos, pois ignora o que acontece em regiões no Universo nas quais o campo gravitacional (a curvatura do espaço-tempo) é muito grande.

Ao incluir a interação com a curvatura do espaço-tempo no conjunto das leis físicas do cosmos, a variação temporal deixa de ser entendida como uma interpretação estranha, pois passa a ser identificada com essa extensão. É natural então que a chamemos de lei cósmica. A hipótese tradicional de considerar as leis físicas como dadas *a priori* impede que consideremos uma dinâmica evolutiva no Universo. Por outro lado, aceitar essa dependência temporal não legitima propostas teleológicas. Ao incorporar a variação das leis físicas no processo de lei cósmica, essa questão perde o sentido. Então, podemos afirmar que a cosmologia, ao adquirir status científico, permitiu esclarecer a distinção entre, de um lado, a extrapolação das leis físicas terrestres para além de nossa galáxia e, de outro, sua compreensão como lei cósmica.

Repetição e diferença (múltiplos ciclos do Universo)

*A instabilidade do vazio permite afirmar
que o Universo estava condenado a existir.*

O exemplo mais contundente que a cosmologia pode nos oferecer se explicita no cenário cosmológico cíclico.

Sabemos que o Universo está em expansão. Depois de um longo período de dominação de uma ideia esdrúxula, associando o seu início a um período extremamente condensado – chamado, pejorativamente, de Big Bang –, foram propostos cenários mais realistas, que consideram o chamado *bouncing*.

Superada essa dificuldade maior do cenário com Big Bang, esses cenários cósmicos permitiram que se examinassem configurações mais sofisticadas e complexas, nas quais teria acontecido mais de um ciclo colapso-expansão.

Nesses diferentes modelos, teria havido uma sucessão de fases de colapso, nas quais o volume espacial diminui com o tempo cósmico, atingindo um valor mínimo para este volume e depois iniciando uma expansão. Os cosmólogos costumam chamar de *Universo* cada uma dessas fases que envolvem colapso e expansão. Ou seja, estaríamos em presença de uma sequência de Universos.

Uma das propostas mais coerentes identifica a origem do colapso inicial à instabilidade do vazio quântico. Como o futuro desse modelo identifica-se com seu passado original, pode-se imaginar uma sequência de Universos que repetem essa sucessão de colapso-expansão indefinidamente.

Essa multiplicidade de configurações do Universo pode ser representada como na figura 29, que contém ciclos de colapso e expansão indefinidamente.

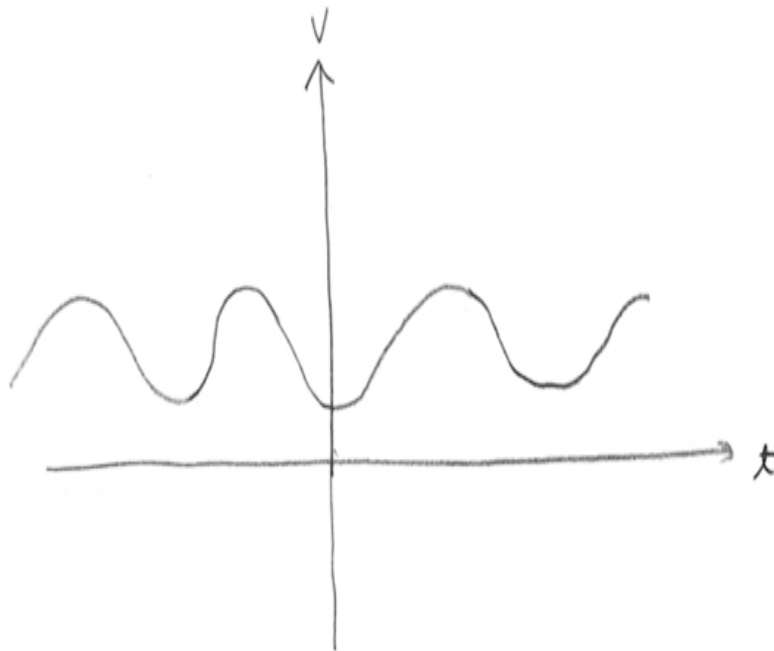


Figura 29. Variação cíclica do volume
do espaço com o tempo cósmico.

Tal cenário foi construído a partir de uma combinação da gravitação, descrita na Relatividade Geral, e do campo eletromagnético não linear. Esse Universo de múltiplos ciclos é uma das notáveis consequências da combinação dos dois campos clássicos conhecidos.

Algumas propostas de Universos cíclicos sugerem que fases sucessivas podem exhibir características distintas, quer na evolução de suas perturbações, quer na sua composição material e até mesmo na evolução das suas leis físicas. Ou seja, as características desses Universos poderiam ser diferentes de um ciclo a outro.

A conjectura segundo a qual o Universo terá um fim como um grande cataclismo (Big Crunch) é uma proposta tão ingênua quanto o processo inverso de sua eventual origem (Big Bang) e só ganha sentido formal no contexto hipotético de uma extensão ilimitada da física terrestre ao cosmos, como profetizou o poeta T. S. Elliot.

Com efeito, seguindo a sugestão daqueles cientistas históricos e evolucionistas, somos levados a concluir que o Universo ainda está em formação, é inacabado, eternamente inacabado, imerso em um processo contínuo de formação, criação e destruição.

Dito de outro modo, assim como este Universo criou a si mesmo a partir de um vazio, quando ele se destruir, sobrá o vazio. A partir desse vazio um novo Universo se construirá.

E depois?

Não temos hoje nenhum indício que permita afirmar que esse processo de criação e destruição tenha um fim.

APÊNDICE A

Frontispícios de alguns artigos citados neste livro

49

ON THE CURVATURE OF SPACE

A. Friedmann
Petersburg

Received: June 29, 1922

§1. In their well known works on cosmological questions Einstein (1917) and de Sitter (1917) have arrived at two types of world structure; Einstein discovered the so-called "cylindrical world", with a time independent curvature; the spatial¹ radius of curvature depending on the total mass in the space; de Sitter has developed a spherical world in which not only space but also, in a certain sense, space-time has a constant curvature (Klein 1918). To this end, Einstein, and also de Sitter, have made assumptions about the matter tensor; namely that the matter is incoherent and nearly at rest; i.e., that the velocity of the matter is sufficiently small compared to the velocity of light.

The purpose of this note is firstly to show that the cylindrical and spherical worlds are special cases of more general assumptions, and secondly to demonstrate the possibility of a world in which the curvature of space is independent of the three spatial coordinates but does depend on time; i.e., the fourth coordinate; the rest of the properties of this new type of world are analogous to the Einstein's cylinder world.

§2. The assumptions on which our treatment rests fall into two classes. To the first class belong assumptions which are common to those of Einstein and de Sitter. They refer to the equations that the gravitational potentials satisfy; and to the state and motion of the matter. The second class of assumptions have to do with, so to say, the geometrical character of the world; from our hypotheses there follow as special cases Einstein's cylinder world and also the spherical world of de Sitter.

The assumptions of the first class are the following:

1) The gravitational potentials satisfy the Einstein equations with a cosmological constant [Gleide-member] that one can also set equal to zero:

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}\bar{R} + \lambda g_{ik} = -\kappa T_{ik} \quad (i, k = 1, 2, 3, 4) \quad (A)$$

Here the g_{ik} are the gravitational potentials, T_{ik} the matter tensor, κ a constant, $\bar{R} = g^{ik}R_{ik}$; R_{ik} is determined by the equation

¹By 'space' we mean here a three dimensional manifold; by 'world' we mean a four dimensional manifold.

Figura 30. Reprodução da primeira página do artigo com que Friedmann estabelece a moderna cosmologia do Universo dinâmico.

Nonlinear photons in the universe

M. Novello and J. M. Salim

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, Brasil

(Received 20 March 1978)

A nonlinear theory of electrodynamics is generated by nonminimal coupling with gravitation. As a result, the photon acquires a mass which depends on the value of the scalar of curvature. A homogeneous isotropic/anisotropic universe filled with such nonlinear photons is presented.

I. INTRODUCTION

One of the most remarkable consequences of the theory of general relativity was the prediction of the bending of light in a gravitational field. This proves that the photon has a passive gravitational energy and, consequently, by means of the equivalence principle, it must have an active gravitational energy, too, which should be responsible for the curvature of space-time generated by photons. Such an influence of gravitation on the behavior of light was shown by Eddington in a memorable exposition.¹ Since then, it has been the subject of a large number of experimental observations. However, the set of equations which governs the coupled system of electrodynamics and gravitation may still be in an incomplete form: We do not really know the behavior of electric and magnetic fields in a strong gravitational field.

In order to arrive at a reasonable theoretical framework, one starts by assuming the so-called minimal coupling principle. Owing to this principle, the equations of motion of electrodynamics in a curved space can be obtained from Maxwell's equations in a flat Minkowski universe without ambiguity. Additional terms which contain the curvature of space-time are usually disregarded for *a priori* reasons, such as the difficulty of compatibility of such terms with charge conservation, for instance, or the high degree of arbitrariness contained in such a coupling.

Irrespective of these arguments, we start here an exhaustive and systematic analysis of nonminimal coupling between vector W_μ and tensor $g_{\mu\nu}$ fields. The main reason which induced us to undertake such a study is linked to the subject of nonlinearities in electrodynamics. These nonlinearities are contained naturally in such nonminimal coupling.

Traditionally, nonlinearities in electrodynamics are introduced either by an *ad hoc* assumption (e.g., Born and Infeld) or by introduction of quantum effects (Euler and Heisenberg; see also Akhiezer and Berestetski² for a more detailed dis-

discussion). The general belief was that the nonlinear theory could change drastically the properties of the field in the neighborhood of an electron, and so could provide a successful electron model.

Other models, however, have been proposed with different leitmotives. It seems worthwhile to recall here a recent interesting suggestion which adds to the usual Maxwell equations a term derived from a Lagrangian of the type $L = \lambda(W_\mu W^\mu)^2$, where λ is a constant. Such a term, which further breaks gauge invariance, can give rise to an inelastic photon-photon interaction. This term has been used tentatively to give an alternative explanation to galactic red-shift anomalies.^{3,4} The theory we will explore here breaks the gauge invariance, too. To first order in the curvature, we can have two possibilities, either

$$L_1 = \sqrt{-g} R W_\mu W^\mu g^{\mu\nu}$$

or

$$L_{II} = \sqrt{-g} R_{\mu\nu} W^\mu W^\nu.$$

In the present paper we will limit our discussion to the case in which the Lagrangian L_1 has to be added to Maxwell's electrodynamics.

The effects of adding such a term to the equation of motion can be interpreted as giving to the photon a mass proportional to the scalar of curvature. As a consequence, the theory will also break conformal invariance. The discussion on massive electrodynamics has an extensive bibliography (see Ref. 4 for an up-to-date review). However, as we will see in this paper, the mass $m_\gamma \sim R^{1/2}$ introduces some very peculiar properties not contained in the usual models.

II. THE MODEL

The equations of motions are obtained from the Lagrangian L , which consists of three parts,

$$L = L_A + L_B + L_G, \quad (1)$$

where

Figura 31. Reprodução da página inicial do artigo em que é apresentada a primeira solução analítica de um Universo não singular gerado por fótons.

NONSINGULAR COSMOLOGY AS A QUANTUM VACUUM EFFECT

V.N. MELNIKOV and S.V. ORLOV

State Committee for Standards, Moscow 117049, USSR

Received 6 December 1978

Spontaneous breakdown of gauge symmetry of a conformal scalar field is shown to lead to the absence of a singularity in an open type homogeneous isotropic cosmology and to variation of the masses from the Planck mass at the initial moment to the graviton mass in the present epoch.

Models with spontaneous symmetry breakdown are very popular in modern quantum theory. In particular, they are investigated in external gravitational fields [1]. We shall be interested mainly in their cosmological effects in the early stages of the evolution as quantum vacuum properties must be essential in strong gravitational fields. These effects will be treated in the framework of the self-consistent conformal scalar and Einstein gravitational field.

A theory of gravitation with a conformal quantized scalar field without selfinteraction was suggested in ref. [2], where static and weakly nonstatic cosmological solutions were found. Nonstatic solutions for a massless scalar field were found in ref. [3]. For results on localized systems including the electromagnetic field see refs. [4,5].

Here we shall demonstrate that the quantum properties of the vacuum lead to cardinal cosmological consequences, i.e. to avoidance of a singularity. Moreover, particle masses vary from the Planck mass at the initial moment up to the graviton mass in the present stage. In the following we treat 3 sources for the Einstein equations: (1) a massless scalar field, (2) the same with radiation and incoherent matter and (3) a massive scalar field with radiation and dust.

1. Let the lagrangian be $L = L_R + L_\phi$, $c = \hbar = 1$, where $L_R = R/2\kappa$,

$$L_\phi = g^{\alpha\beta} \nabla_\alpha \phi^* \nabla_\beta \phi - \frac{1}{2} R \phi^* \phi - \frac{1}{2} \lambda (\phi^* \phi)^2. \quad (1)$$

To this lagrangian correspond Einstein equations

with the scalar field energy-momentum tensor, suggested in ref. [6] and the scalar field equation

$$\square \phi + \frac{1}{2} R \phi + \frac{1}{2} \lambda \phi^* \phi^2 = 0. \quad (2)$$

Eq. (2) is conformal-invariant. The Einstein lagrangian (as well as the mass) violate the conformal invariance of the whole system. The gravitational field is considered to be classical, but the ϕ -field quantized [2,1], so in the right-hand side of the Einstein equations we have the vacuum expectation value of the energy-momentum tensor [2].

The lagrangian (1) is invariant under the gauge transformations of the scalar field: $\phi \rightarrow \phi e^{i\alpha}$, $\phi^* \rightarrow \phi^* e^{-i\alpha}$. If we neglect vacuum fluctuations one may show [1] that for a massless scalar field in the metric of the open isotropic model,

$$ds^2 = a^2(\eta) [d\eta^2 - d\chi^2 - \sinh^2 \chi (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)],$$

there is a spontaneous breakdown of gauge symmetry. For the vacuum expectation value, defined in the initial moment, there are stable solutions of eq. (2),

$$\ddot{f} - f + f^3 = 0, \quad \langle 0|\phi|0\rangle = \sqrt{3/\lambda} f(\eta)/a(\eta),$$

where $f = \pm 1$, to which a negative energy integral corresponds. The trivial solution $f = 0$ with zero energy is unstable. According to ref. [1] the energy and pressure densities of a massless scalar field in a nonsymmetric vacuum state are:

$$\epsilon(\eta) = \langle 0|T_0^0|0\rangle = -3/2\lambda a^4(\eta),$$

$$p(\eta) = \langle 0|T^f_f|0\rangle = -1/2\lambda a^4(\eta) \quad (3)$$

Figura 32. Reprodução da página inicial do artigo em que é apresentada a primeira solução analítica de um Universo não singular gerado por um campo escalar sem massa.



Volume 463, No. 4, July 2008

ISSN 0370-1573

PHYSICS REPORTS

A Review Section of Physics Letters

BOUNCING COSMOLOGIES

M. NOVELLO, S.E. Perez BERGLIAFFA

Available online at

 **ScienceDirect**
www.sciencedirect.com

<http://www.elsevier.com/locate/physrep>

Figura 33. Reprodução da capa do texto em que diversos cenários cosmológicos sem singularidade, com bouncing, são apresentados e discutidos. A publicação desse artigo em uma revista científica tão importante foi o momento simbólico em que cenários com bouncing passaram a ser aceitos como realistas pela comunidade científica internacional.

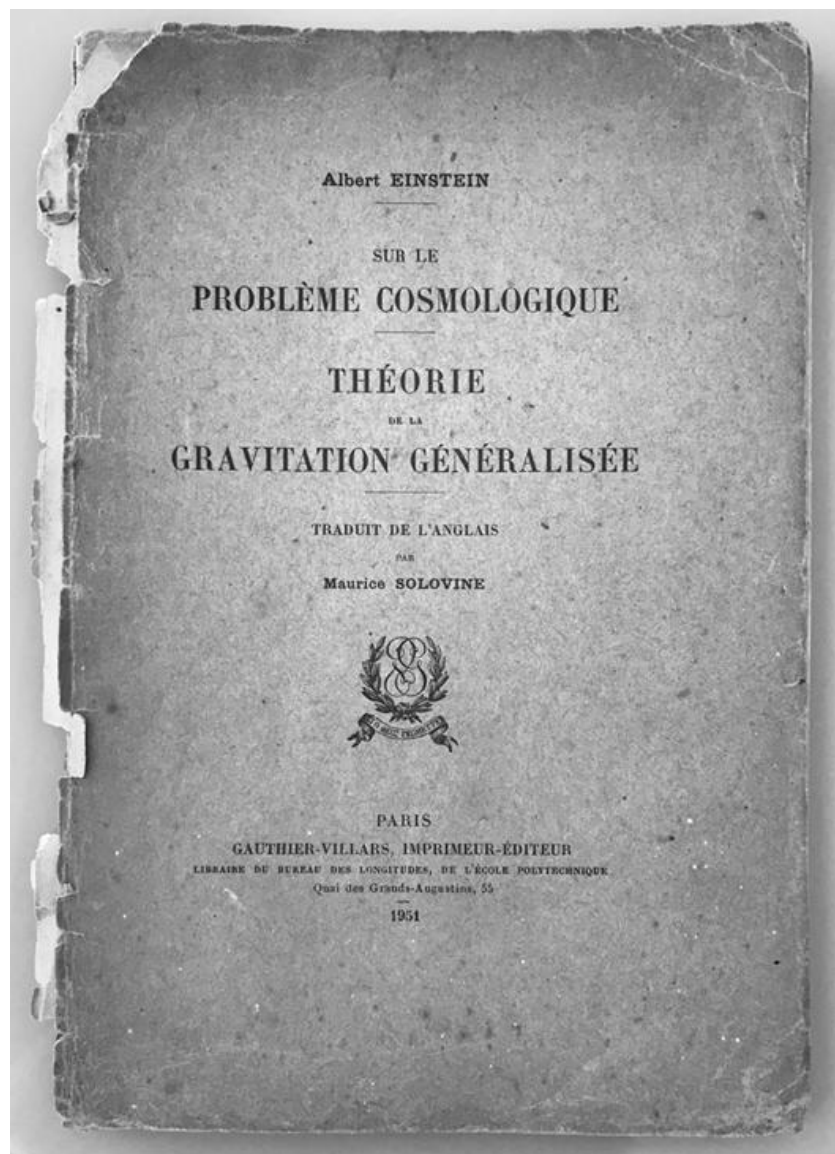


Figura 34. Reprodução da capa do livro em que Einstein trata de cosmologia e reconhece, trinta anos depois, a importância da descoberta de Friedmann. Na segunda parte do livro, ele apresenta, sem sucesso, uma tentativa de unificação das forças clássicas de longo alcance (eletromagnetismo e gravitação).

APÊNDICE B

Campos de longo alcance, gravitação e eletromagnetismo (de Newton a Einstein, de Maxwell a Born-Infeld)

Existem somente dois campos de longo alcance no Universo. Até o começo do século XX, a dinâmica desses campos era descrita por teorias lineares. Na gravitação, a famosa lei de Newton. No eletromagnetismo, as equações de Maxwell. O uso dessas teorias ao longo do tempo permitiu que grande número de problemas fosse compreendido, desde o movimento dos planetas em torno do Sol até o comportamento de elétrons no interior dos átomos.

Ao longo do século XX, as teorias clássicas das forças de longo alcance sofreram enorme transformação. A antiga força gravitacional foi alterada profundamente por Einstein, em sua Teoria da Relatividade Geral. Fenômenos não lineares também apareceram no eletromagnetismo. As razões que levaram os físicos a procurar teorias mais sofisticadas, de caráter não linear, para essas duas interações têm origens bem diferentes.

No caso da gravitação, podemos identificar o aparecimento da Teoria da Relatividade Restrita como o ponto crucial da mudança. A razão é simples: a Relatividade Especial requer a existência de um limite máximo de propagação de qualquer informação. Ora, a teoria de Newton trazia sub-repticiamente a ideia de propagação instantânea, incompatível com a Relatividade Especial. A dinâmica do campo gravitacional sofreu uma transformação radical. A Teoria da Relatividade Geral associa a interação gravitacional a alterações na geometria do espaço-tempo, produzida por qualquer forma de energia e matéria. Nessa teoria, qualquer forma de energia, e não somente a massa dos corpos, gera gravitação. Ora, como a gravitação também tem energia, segue-se que ela também gera campo gravitacional. Ou seja, gravitação gera gravitação. Consequentemente, aparece a não linearidade.

No eletromagnetismo, à parte o desenvolvimento da teoria quântica, o principal fator a conduzir os físicos a uma versão não linear deveu-se à presença de singularidades no eletromagnetismo de Maxwell. Alterações não lineares permitiram que se formulasse uma teoria eletromagnética sem singularidades, mesmo no mundo clássico. Caso típico e bem-sucedido foi a proposta apresentada por Max Born e Leopold Infeld na década de 1930.

Eliminando as singularidades do campo eletromagnético

Uma das maiores dificuldades da teoria do eletromagnetismo clássico está associada à presença de divergências. Por exemplo, sabia-se de longa data que ao longo da linha de Universo de uma partícula carregada – digamos, o elétron – o campo assume valor infinito. A tradição da física requer que os infinitos de uma teoria sejam de alguma forma proibidos de acontecer. Na teoria de Maxwell, essa dificuldade é central. Embora não tenha sido resolvida, foi transcendida com sua versão quântica. Mas a questão permaneceu: pode uma teoria clássica do campo eletromagnético eliminar essa singularidade?

Em um artigo seminal de 1934, os físicos Max Born e Leopold Infeld argumentaram que quantidades divergentes, admitindo a possibilidade de valores ilimitados, deveriam estar ausentes de toda teoria clássica de campo para não violar o princípio de finitude da energia. Ou seja, as quantidades observáveis de uma teoria só podem ser finitas. Consequentemente, a teoria linear de Maxwell de processos eletromagnéticos deveria ser alterada para que não apresentasse essas singularidades.

Para contornar essa dificuldade, Born e Infeld propuseram que a descrição do campo eletromagnético fosse modificada, para que ela contivesse explicitamente a impossibilidade formal de admitir valores infinitos em qualquer circunstância. Passou-se assim de uma teoria simples, linear, para outra formulação mais complexa, não linear, de modo que os campos eletromagnéticos na nova teoria sejam bem-comportados, isto é, finitos.

Em condições usuais nos laboratórios terrestres, a teoria linear de Maxwell produz uma boa explicação dos fenômenos. Somente na presença de campos extraordinariamente elevados, como os existentes no cosmos, essa alteração não linear é particularmente importante.

Eliminando as singularidades do campo gravitacional

Na cosmologia, em que a Relatividade Geral e a teoria de Maxwell se combinam, um comportamento singular para a geometria do Universo é inevitável. Essa dificuldade só pode ser ultrapassada quando processos não lineares do eletromagnetismo são considerados.

No caso do campo gravitacional, a questão singular adquiriu uma dramaticidade que inexistia no campo eletromagnético, pois a singularidade cósmica do campo gravitacional foi associada ao início da existência do Universo. Isso ocorreu de modo transparente na forma de descrição da geometria em um Universo em expansão. Ao longo de várias décadas, logo em seguida à publicação do modelo de Friedmann, muitas críticas questionavam a existência da singularidade naquela geometria, mas, somente em 1979, soluções analíticas de cenários de Universos espacialmente homogêneos e isotrópicos vieram à luz. Desde então, cenários cosmológicos em que a singularidade inicial não existe têm sido intensamente estudados. Esses cenários sem singularidades iniciaram uma nova fase da cosmologia, abrindo a possibilidade de um *bouncing*.

O Universo homogêneo e isotrópico

Desde o primeiro modelo cosmológico, proposto por Einstein, utiliza-se um sistema de coordenadas gaussiano, com um tempo global e uma superfície tridimensional que chamamos espaço. Essa superfície é entendida como homogênea e isotrópica. As observações não invalidaram essas hipóteses até hoje.

Trata-se de um resultado importante, pois nesse caso a dinâmica de evolução do Universo é dada por uma única função do tempo $a(t)$, chamada fator de escala. O volume total do espaço nada mais é do que o cubo dessa função. A maior dificuldade desses cenários consiste na propriedade inerente aos modelos cosmológicos tradicionais, gerados por um fluido perfeito com densidade de energia e pressão positivas, que implicam a presença de uma singularidade. Ela aparece ao se notar que, nesses modelos, a função $a(t)$ pode ter tido valor nulo em um passado finito. Nesse ponto, as quantidades escalares, invariantes, associadas à curvatura do espaço-tempo, assumem valor infinito, isto é, não poderiam jamais ser observadas.

O campo eletromagnético como energia da evolução cósmica (Maxwell e a singularidade cósmica)

No Congresso Solvay, de 1958, o cientista Fred Hoyle examinou a possibilidade de existir um enorme campo magnético primordial, que seria o principal responsável pela evolução do Universo. Mais tarde, abandonou essa ideia para desenvolver sua teoria da criação contínua de matéria. Em 1965, o cientista russo Yakov Zeldovich reexaminou a proposta do campo magnético e apresentou argumentos de que ele poderia efetivamente gerar um Universo anisotrópico especial em um estágio anterior ao cenário isotrópico atual.

Ao se considerar o campo eletromagnético como principal fonte da energia capaz de controlar a evolução da geometria do Universo, a primeira questão que aparece é como se pode compatibilizar este campo com uma geometria espacialmente isotrópica, na qual não existe uma direção espacial privilegiada.

A razão da dificuldade em considerar o campo eletromagnético como controlador da evolução da geometria do Universo está relacionada à propriedade de ele ser representado por um vetor. Isso implica que a existência de campos elétrico e magnético faz aparecer direções privilegiadas, associadas a esses dois vetores.

Para contornar essa dificuldade, o físico Richard Tolman propôs um critério segundo o qual é possível que o campo eletromagnético possa dar origem a uma geometria do tipo proposto por Friedmann, ou seja, homogênea e isotrópica. Para isso, um procedimento de média espacial deveria entrar em ação. Desde então, esse método de

média tem sido usado. Tornou-se padrão, permitindo descrever o estágio condensado do Universo em seus momentos iniciais da atual fase de expansão – um Universo espacialmente homogêneo e isotrópico – como uma radiação de gás de fótons.

Qualitativamente e de forma simplificada, sua argumentação pode ser exposta assim: em um Universo no qual não existe direção privilegiada, devemos considerar que todas as direções dos campos eletromagnéticos são igualmente possíveis. Desse modo, a distribuição de energia – fonte da gravitação – pode ser obtida por meio de um procedimento de média. Embora estes dois vetores (os campos elétrico e magnético) tenham média nula (ou seja, não exibam direção privilegiada), o produto deles entre si (que é a forma como esses campos contribuem para a densidade de energia) pode não ser nulo. Graças a esse procedimento, o resultado final reduz a distribuição de energia desses campos como um fluido perfeito. Na teoria linear de Maxwell, esse fluido é tal que sua pressão é $1/3$ da densidade de energia. Usando essa distribuição de energia nas equações da Teoria da Relatividade Geral, obtém-se um cenário cosmológico no qual a geometria do Universo, homogênea e isotrópica, apresenta uma dinâmica expansionista singular. Somente indo além dessa linearidade, podem-se obter cenários cosmológicos mais realistas, sem singularidade.

APÊNDICE C

Universo magnético

(regularizando os dois campos clássicos na construção de um modelo cosmológico)

Recentemente, a proposta de Zeldovich foi retomada. Cenários cosmológicos nos quais somente a parte magnética do campo eletromagnético sobrevive têm sido intensamente estudados. A contribuição do campo magnético à energia cósmica tem uma propriedade notável, associada ao processo de média: a evolução temporal do campo magnético médio independe da forma de sua dinâmica, pois decorre somente da lei de conservação da energia. Ou seja, qualquer que seja a teoria eletromagnética (forma linear de Maxwell, expressão não linear de Born-Infeld ou uma sequência de expressões que determina sua evolução), a dependência temporal é a mesma. A origem dessa propriedade deve-se ao procedimento de média, que reduz a importância da dinâmica do campo eletromagnético na formação da curvatura do espaço-tempo. Essa propriedade notável implica que a dependência do campo magnético ao tempo é controlada somente pela lei de conservação da energia.

Na geometria espacialmente homogênea e isotrópica que associamos ao Universo, a única função que a determina completamente é a variação temporal de seu volume. A lei de conservação da energia implica que neste cenário geométrico o campo magnético varia com o inverso de seu volume elevado à potência $2/3$.

Assim, se a dinâmica do campo eletromagnético é constituída por um polinômio (digamos P_1 , P_2 , P_3 e P_4) de quantidade invariante do campo, suas diferentes componentes se comportam como fluidos perfeitos independentes uns dos outros. Tudo se passa como se o campo magnético médio pudesse ser descrito como um conjunto de fluidos perfeitos independentes de energias distintas E_1 , E_2 , E_3 e E_4 , respectivamente. Essa propriedade permite a existência de diferentes fases do Universo. Em certas fases da evolução do Universo, ele atinge o valor zero, mais de uma vez. Nesses momentos, um notável processo autorregulador se estabelece, impedindo que a energia deixe de ser positiva.

Em consequência, a geometria descreve um Universo com fases de colapso e de expansão gravitacional. Cada vez que a densidade de energia se anula, o Universo passa de uma fase a outra. Por exemplo, transforma a contração em expansão quando seu volume atinge o valor mínimo, diferente de zero. Em outro momento, quando ele está em grande expansão, ocorre o inverso: quando a densidade novamente se anula, o Universo passa da fase de expansão ao colapso. Essas fases sucedem-se continuamente, produzindo uma estrutura cíclica.

O cenário do Universo cíclico pode ser pensado como resultado de uma simetria cósmica entre a energia magnética fraca e forte. Dito tecnicamente, a densidade de energia magnética é invariante se o fator de expansão $a(t)$ é trocado pelo fator inverso $1/a(t)$.

Isso permite, de um só golpe e somente com uma fonte – a energia magnética –, solucionar tanto o problema da singularidade inicial quanto o da aceleração atrasada do Universo.

Síntese do Universo magnético autorregulador

Neste cenário, a evolução da geometria do Universo é dominada integralmente, em toda a sua história, pela interação dos campos magnético e gravitacional. Uma combinação dos dois únicos campos de longo alcance produz a evolução da estrutura métrica do espaço-tempo, cujas dinâmicas são controladas pela Teoria da Relatividade Geral e por uma teoria não linear para o campo eletromagnético.

Essa estrutura não possui singularidade e tem um sistema autorregulador que impede uma densidade negativa de energia, bem como inibe o campo gravitacional de possuir singularidade, limitando um valor mínimo possível para o volume total do espaço tridimensional.

Existe um ciclo básico de evolução, que se repete, a partir da simetria campo forte-campo fraco, consistindo nas seguintes etapas:

1. O Universo possui uma fase colapsante até seu volume atingir um valor mínimo. Nesse ponto, a densidade de energia vale zero e o fator de expansão, ou seja, o volume espacial total, tem um mínimo;
2. Passada aquela fase, o Universo inicia uma fase de expansão;
3. Em momento posterior, acontece uma fase de aceleração;
4. Essa fase encerra-se quando a densidade de energia volta a ter o valor zero e o Universo transforma sua expansão em colapso;
5. Chega-se à fase primeira deste processo. Acontece uma nova série colapso-*bouncing*-expansão-aceleração-colapso;
6. Esses ciclos podem ser repetidos indefinidamente.

APÊNDICE D

É o espaço-tempo uma substância?

A moderna versão de interação de corpos de qualquer natureza requer que esse processo seja descrito como a troca de partículas elementares, típicas de cada interação. Por exemplo, a interação de corpos carregados eletricamente se faz por troca de fótons, os grãos elementares da luz. Ou, para usar o termo técnico, os *quanta* de luz. Essa forma de entender toda forma de interação coloca de imediato a questão: e a gravitação? Se ela for pensada como um campo de forças (como o campo eletromagnético), isso implica que deve existir seus *quanta* correspondentes, denominados grávitons. Mas se aderirmos exclusivamente à versão geométrica da Relatividade Geral, isso significa que o espaço-tempo deveria ser pensado como uma substância.

O começo do século XX viu surgir duas grandes e profundas alterações na descrição física do mundo: a Teoria da Relatividade Especial e a Teoria Quântica da Matéria. A primeira desenvolveu-se a partir de observações sobre a velocidade de propagação da luz. Considerações feitas a partir de experiências com o eletromagnetismo levaram à proposta de que haveria uma velocidade máxima de propagação de toda forma de energia, e essa velocidade máxima era aquela associada à propagação dos fenômenos eletromagnéticos. O desenvolvimento formal dessa ideia levou cientistas como Poincaré, Lorentz, Minkowski, Einstein e outros a elaborar novos conceitos que desembocaram, em 1905, na síntese feita por Einstein na Teoria da Relatividade Especial. A principal consequência pode ser resumida na frase: não pode existir nenhuma forma de energia que se propague com velocidade superior à da luz. Como consequência importante, cada observador caracteriza o tempo de acordo com seu estado de movimento ou repouso. Ou seja, cada corpo possui um tempo próprio.

Tal princípio criava uma enorme dificuldade para a descrição de Newton da interação gravitacional, até então dominante, pois ela não requer um agente físico capaz de transportar o fenômeno da gravitação. Em verdade, a questão de propagação sequer se colocava, pois a imagem mental da força gravitacional então aceita entre os cientistas admitia uma atuação instantânea. A profunda modificação da formulação newtoniana, produzida pela Teoria da Relatividade Geral, em 1915, embora tenha alterado muito essa visão, não eliminou completamente uma certa dose metafísica associada a esta força. Dito de outro modo, menos radical: não produziu um cenário no qual a transmissão da gravitação se faria também por algum intermediário corpóreo, alguma substância material, mesmo diáfana, como o fóton nos processos eletromagnéticos.

A principal distinção introduzida pela formulação de Einstein para a gravitação, capaz de adaptá-la à Teoria da Relatividade Especial, só requeria que essa ação não fosse instantânea. Deveria haver uma propagação através do que Poincaré chamou de “ondas gravitacionais”.

Quando Einstein elaborou sua teoria da gravitação, na segunda década do século XX, a teoria quântica estava no começo e ainda não havia realizado seu grande movimento de unificação com a Relatividade Especial. A Teoria Quântica dos Campos, um modo completamente novo de interpretar a ação das forças sobre os corpos, só apareceria algumas décadas depois.

Mais tarde, quando a mecânica quântica adquiriu um status formal elevado junto à comunidade científica e gerou a Teoria Quântica dos Campos, o modo de interpretar interações de corpos foi profundamente alterado. Esse processo, a interação de corpos, tradicionalmente identificado como uma força, passou a ser descrito como uma troca de partículas minúsculas, os *quanta* dos campos de interação. Tal procedimento foi bem-sucedido no nível das interações de partículas elementares e até mesmo na força clássica de longo alcance, o eletromagnetismo. Nesse caso, os fótons carregariam a informação através do espaço-tempo da ação (da força) eletromagnética.

Dito de outro modo, quando dois corpos carregados interagem via processo eletromagnético, isso é entendido como troca de fótons, os grãos elementares do campo eletromagnético.

Entretanto, quando Einstein sugeriu que a matéria ou a energia, sob qualquer forma, *produzia uma curvatura no espaço-tempo*, a comunidade científica não considerou necessário imaginar que a matéria agia sobre alguma coisa (material), mas sim sobre essa quantidade matematicamente precisa, a “geometria” do espaço-tempo.

Essa hipótese geométrica para descrever a força gravitacional trouxe boas consequências, produzindo explicações melhores do que a teoria newtoniana sobre alguns processos astronômicos. Por isso, essa singular característica isolada da gravitação não foi entendida como uma dificuldade. Foi, simplesmente, ignorada.

A ideia de que a gravitação é uma força especial, à parte das demais, pois universal, se consubstanciou e impediu que aparecesse a questão: é o espaço-tempo uma substância? Através dessa substância corpórea (o espaço-tempo material), qualquer forma de matéria e energia interagiria gravitacionalmente através dessa descrição matemática, sua geometria.

O século XX foi cenário de transformações profundas na descrição do mundo físico. Por um lado, materializou-se todo tipo de processo de interação através da quantização das forças no mundo microscópico e na interação eletromagnética. Somente a gravitação resistiu a esse processo, embora tenham surgido inúmeras propostas para sua possível quantização.

Alguns cientistas tentaram ultrapassar essa dificuldade e mostrar como seria possível adequar a Relatividade Geral à mesma estrutura formal das demais interações. Em um primeiro momento, isso foi tentado introduzindo-se um campo tensorial, esperando que, em um momento posterior, ele seria quantizado e identificado com uma partícula de spin 2. Mas essas diversas propostas não tiveram êxito.

Continuamos não respondendo à questão fundamental: é o espaço-tempo uma substância?

Mesmo depois de mais de cem anos de sucesso da Teoria da Relatividade Geral, não causa nenhum desconforto entre os cientistas a ideia de que matéria e energia, sob qualquer forma, atuam sobre alguma coisa que não é nem matéria nem energia, é a geometria do espaço-tempo.

Em verdade, a teoria da gravitação que Einstein propôs na Relatividade Geral produziu um modo de descrição totalmente distinto das demais interações ao identificar a força gravitacional à geometria do espaço-tempo. Ele considerou a hipótese na qual o espaço-tempo teria propriedades típicas de uma substância. Sua característica principal identifica-se com sua geometria. A matéria, sob qualquer forma, assim como todo tipo de energia, atua sobre esse espaço-tempo alterando a forma dessa geometria. Por sua vez, esse espaço-tempo, através de sua geometria, atua sobre os corpos, alterando seu movimento. Ou seja, trata-se de um processo de interação geometria-matéria.

Ela deu origem a uma figura estranha na descrição da física: a geometria do mundo como uma estrutura material que todos os demais corpos podem influenciar e que, por sua vez, pode influenciar tudo o que existe, ou seja, qualquer forma de matéria e energia.

Essa interpretação transformou a descrição do espaço-tempo: de uma figura de representação passamos a uma imagem típica da matéria. Isso criou, de imediato, a questão: devemos entender a geometria do espaço-tempo como uma forma especial de substância? Ou seja, o espaço-tempo tem propriedades que permitem que ele seja considerado como uma substância?

Substância é matéria, ou seja, age sobre outra substância. Nesse sentido, a geometria seria uma substância. Mas, assim como a substância átomo se compõe de outras substâncias (as partículas nêutron, próton, elétron), seria a geometria um substância composta?

Jean Largeault ensina que “substância forma-se a partir do latim *sub* e *stare*. A substância é o que se mantém (permanência) sob (as aparências e as qualidades mutantes).”

Pode existir um intermediário material capaz de carregar a informação da interação gravitacional. Pode ser que ele tenha a aparência de um campo que admita uma descrição geométrica ou uma combinação de vários campos. Ambas as possibilidades estão sendo estudadas, embora a maioria prefira a descrição do campo como Feynman propôs, como um campo de spin 2. No entanto, outras possibilidades apareceram recentemente, sob novas formas associadas a uma descrição na qual a geometria seria simplesmente consequência da ação de campos escalar e/ou spinorial. Em qualquer caso, a métrica seria construída com esses campos. Ela não teria uma dinâmica própria, mas herdaria a dinâmica dos campos que geram o fenômeno que chamamos gravitação. Isso leva a ultrapassar a Teoria da Relatividade Geral. Veremos, nos próximos anos, a evolução dessas ideias.

Referências

- BITTENCOURT, E.; NOVELLO, M. “Metric Relativity and the dynamical bridge”. *Brazilian Journal of Physics*, 45, 756, 2015.
- BRUNO, Giordano. *L’infinito, l’universo e i mondi*. Ed. Berg International, 2006.
- DE LORENCI, V.; KLIPPERT, R.; NOVELLO, M.; SALIM, J. M. *Physical Review D* 65, 063501 (2002).
- DIRAC, P. A. M. *Lectures on Quantum Field Theory*. Nova York, 1966.
- LAUTMANN, A. *Les Mathématiques, les Idées et le réel physique*. Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 2006.
- LEMAÎTRE, Georges. *The Primeval atom (an essay on cosmogony)*, Van Nostrand Company, 1950. Tradução baseada no texto *L’Hypothèse de l’atome primitif*. Neuchâtel, Griffon, 1946.
- MAYR, Ernst. *What Makes Biology Unique? Considerations for the Autonomy of a Scientific Discipline*. Cambridge e Nova York: Cambridge University Press, 2004. [*Biologia, ciência única: reflexões sobre a autonomia de uma disciplina científica*. Tradução de Marcelo Leite. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.]
- NIETZSCHE, Friedrich. *La téléologie à partir de Kant*. Paris: Association Culturelle Eterotopia France, 2017.
- NOVELLO, Mario. *Cosmos et Contexte* (1987). Paris: Ed Masson. Tradução Forense Universitária (1988).
- . *Máquina do tempo: um olhar científico*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2005.
- . *Do Big Bang ao Universo eterno*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2010.
- . *O Universo inacabado*. São Paulo: N-1 edições, 2018.
- . *Os cientistas da minha formação*. Ed. Livraria da Física, 2016.
- NOVELLO, M.; ARAÚJO, Aline N.; SALIM, J. M. “Cyclic Magnetic Universe”, *International Journal of Modern Physics A*, 24, 5639 (2009).
- NOVELLO, M.; BERGLIAFFA, S. E. P. “Bouncing Cosmologies”, *Physics Report* 463, 127 (2008).
- NOVELLO, M.; DUCAP, C. E. L. “The Cosmological origins of nonlinear Electrodynamics. In *Grav. Cosmol.* 23 (2017) 128.
- NOVELLO, Mario; RODRIGUES, Ligia M. C. S. “Bifurcation in the early cosmos”, *Lettere al Nuovo Cimento* 40 (1984), p. 317.
- NOVELLO, M.; SALIM, J. M.; FALCIANO, F. T. “On a geometrical description of quantum mechanics”. In *Int. Journal of Geom. Meth. Mod. Phys* 8 (2011) 87. PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. *La Nouvelle alliance*. Ed. Gallimard, 1979.
- SUPIOT, Alain et al. *La Solidarité (enquête sur un principe juridique)*. Ed. Odile Jacob, 2015.
- TOLMAN, R. C.; EHRENFEST, P. *Physical Review* 36, 1791 (1930).

A questão da origem da massa e a evolução do Universo foram apresentadas de modo popular em <http://www.marionovello.com.br/wp-content/uploads/2014/07/SAB-07-2011.pdf>.

Para os artigos de natureza técnica, ver em www.marionovello.com.br

Tipografias: Minion Pro e Din Pro